EVOLUCION RECURRENTE DE LOS LAGARTOS • INTERFEROMETROS OPTICOS



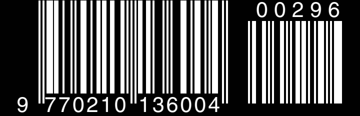
MAYO 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

DINAMICA INTERNA Y CONFIGURACION DE LA TIERRA

EL SENTIDO DEL GUSTO

GEOGRAFIA DE LA POBREZA Y LA RIQUEZA

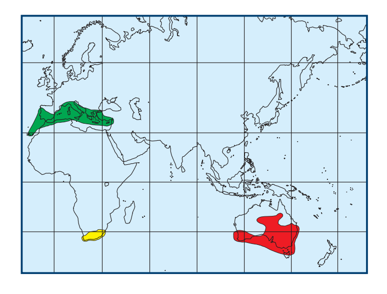




Mayo de 2001 Número 296

SECCIONES





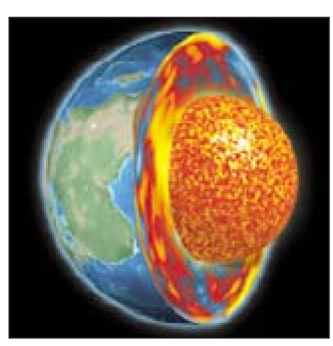








Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



Portada: William Haxby y Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	Catherine Ledner *Stone*
6-7	Keith Kasnot (*ilustraciones*); Biophoto Associates/Photo Researchers, Inc. (*Papila*); Photo Researchers, Inc. (*Botón gustativo*)
8-9	Jared Schneidman Design
10	Edward Bell
11	Laurie Grace
14-15	Roberto Osti
16-17	Roberto Osti (*mapa*); Jonathan B. Losos (*fotografías*)
18	Laurie Grace
19	Roberto Osti
22-24	David Fierstein
25	D. Fierstein, fuente: Jeroen Ritsema
26-29	David Fierstein
44-49	Patricia J. Wynne
50-51	Christian A. Hummel USNO/NRL Proyecto de Interferometría Optica (*arriba*); Roger Ressmeyer (*abajo*)
52	Cortesía del grupo astrofísico John Young Cavendish (*Betelgeuse*); Slim Films (*dibujo*); Dennis di Cicco (*sol*)
53	Slim Films
54	Inst. Carnegie de Washington
55	Slim Films (*arriba*); Michael Collier y Nathaniel White *NPOI* (*abajo*)
56	Johnny Johnson, fuente: *NPOI*
57	Johnny Johnson, fuente: Interferómetro Mark III
60-68	Clemente Ramis, Romualdo Romero, Víctor Homar y Sergio Alonso
70-71	Samuel Velasco, fuentes: The World Bank, *The World Factbook* (Cia, 1996 y 1997), The Global Demography Project y The Environmental Systems Research Institute
72	R. Janke/*Peter Arnold, Inc.*
73	R. Giling/*Peter Arnold, Inc.*
74-75	Samuel Velasco; fuentes: The World Bank, *The World Factbook* (Cia, 1996 y 1997) y Modern Physical Geography, de Alan H. Strahler y Arthur N. Strahler (John Wiley & Sons, 1992)
77	PLS según Michel Kazanski y Hervé Halbout *(mapas)*; Eddy Krähenbühl/Museos de París 1997
78	Patrick David/Museo de Normandía, Caen
79	Christian Pilet/CRAM (*arriba*); Patrick David/Museo de Normandía, Caen (*abajo*)
80	C. Pilet/CRAM (*abajo en la figura superior*), C. Bonnet (*arriba*) y P. David (*derecha*); Didier Paillard (*abajo*)
81	P. David (*a*), Gilles Lecrosnier (*b*, *d*, *e* y *f*), Museo Nac. Hongrois (c); Eddy Krähenbühl (*dibujo*)
82	Patrick David

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

José M.ª Valderas Martínez: *El sentido del gusto* y *Nexos*; Joandomènec Ros: *Evolución de los lagartos del Caribe*; Sònia Ambròs: *La superficie de la Tierra, expresión de su dinámica interna*; Cristóbal Pera: *Anatomía de larga vida*; M.ª Rosa Zapatero: *Interferometría estelar*; José Manuel García de la Mora: *Geografía de la pobreza y la riqueza* e *Integración de los bárbaros en la sociedad galo-romana*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

Difusión controlada



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

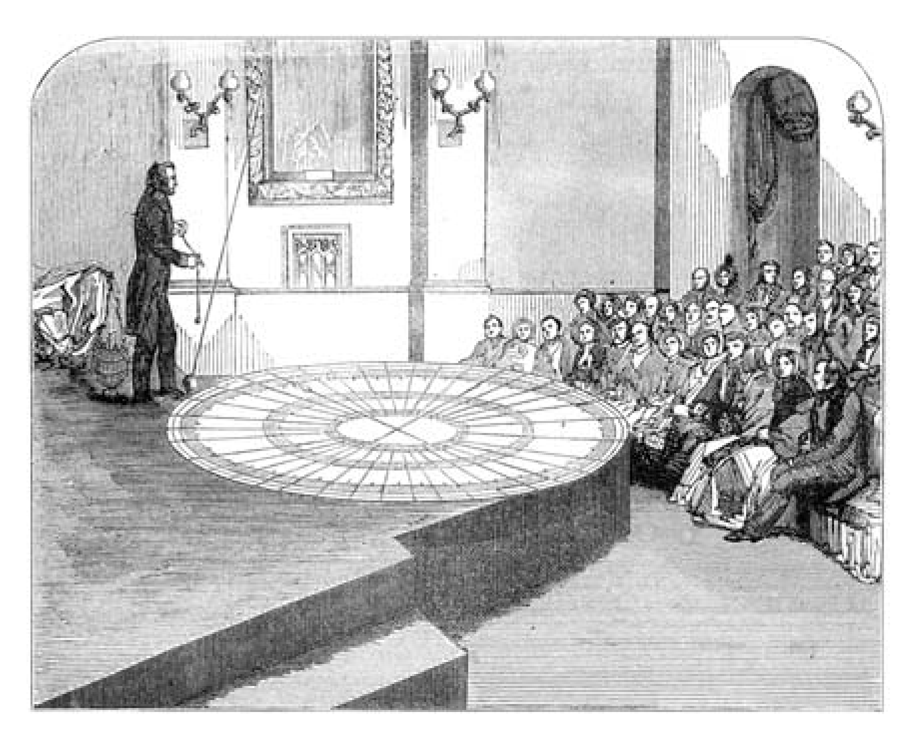
VIRUS. «Si se contempla la situación médica en Norteamérica o Australia, el cambio actual más importante que se observa es la decreciente relevancia de las enfermedades contagiosas. Los hospitales de infecciosos están desapareciendo o siendo convertidos a otros usos. Con una utilización a fondo de nuestros conocimientos es posible controlar eficazmente las enfermedades infecciosas principales, con la notoria excepción de la poliomielitis. Según yo aprecio, el interés de los virus para la biología reside, sobre todo, en la posibilidad de emplearlos como sonda para estudiar la estructura y el funcionamiento de las células que infectan. —F. M. Burnet, director del Instituto Walter y Eliza Hall de Investigación Médica en Melbourne» [*Nota de la redacción: Burnet ganó el premio Nobel de fisiología y medicina de 1960.*]

...cien años

EL ELECTRÓN, ACEPTADO. «Si se demostrara por completo la teoría corpuscular del profesor J. J. Thompson, se operaría una revolución en nuestra concepción de la química. En reciente conferencia ante la Regia Institución, eligió como tema 'La existencia de cuerpos más pequeños que los átomos'. Al proponer su teoría al mundo científico, hace tres o cuatro años, fue recibida con incredulidad, pero hoy ya la aceptan numerosos científicos. El profesor considera que los átomos químicos están formados por un gran número de cuerpos similares que él llama 'corpúsculos'. Según los resultados de sus experimentos con diferentes sustancias la masa de un corpúsculo negativo es del orden de 1/500 la del átomo de hidrógeno.»

LINGUA FRANCA. «Según informes fechados en Frankfurt el 7 de marzo de 1901, el emperador ha decretado la enseñanza del inglés en los institutos de segunda enseñanza de Alemania, en sustitución del francés, que a partir de ahora será optativo.»

MORADAS EN PEÑASCOS. «En Mesa Verde, en Colorado, hay centenares de ruinas. Pero va a perder su condición de parque público, para detener la explotación comercial de los trabajos de los antiguos habitantes de las cuevas. Descubiertas hará unos veinticinco años, las ruinas de Mesa Verde permanecieron durante mucho tiempo inmutables e incluso sin visitar, a causa de la inaccesibilidad del lugar. Pero a lo largo de los últimos diez años, los rancheros que habitan en la vecindad descubrieron que los especímenes procedentes de las ruinas poseen un valor comercial, y la actividad comenzó por despojar a los restos de cuanto pudiera ser transportado.»



...ciento cincuenta años

SE ABRE EL PALACIO DE CRISTAL. «Se calcula en más de tres millones de personas el público que en las cercanías de Hyde Park asistió a la inauguración de la Gran Exposición por la Reina y Su Alteza Real».

CAUCHO DURO. «Patente, a Nelson Goodyear, de Nueva York, por una mejora en la manufactura del caucho de la India: 'Reivindico la combinación del caucho con azufre, con o sin goma laca, para hacer una sustancia dura e inflexible hasta ahora desconocida.'» [Nota de la redacción: Charles, hermano de Nelson, había inventado el proceso para estabilizar el caucho en bruto en 1839. Los fabricantes utilizaban el caucho vulcanizado para productos hechos hoy de plástico, tales como plumas de escribir y componentes eléctricos.]

EL PÉNDULO DE FOUCAULT. «El grabado adjunto muestra al doctor Bachhofer, del Instituto Politécnico de Londres, explicando el experimento de Monsieur Foucault, del mismo modo que en el Panteón de París, para poner de manifiesto la rotación del globo. Fija sobre el suelo hay una tabla circular, de unos cinco metros de diámetro, que supone gira con la Tierra; mientras, una bola de trece kilos de peso cuelga de un cable de 14 metros de largo y vibra [oscila] sobre la superficie de la tabla. El plano de vibración no cambia nunca, pero la rotación de la tabla, y por tanto la de la Tierra, es visible. El experimento es objeto de una gran controversia en Inglaterra, afirmando unos que se trata de un engaño y otros probando lo contrario.»

El sentido del gusto

¿Cómo identifica la lengua las sensaciones de dulce, salado, ácido y amargo? La ciencia está descubriendo las interpretaciones que realiza el cerebro de esas señales, traducidas en los distintos gustos

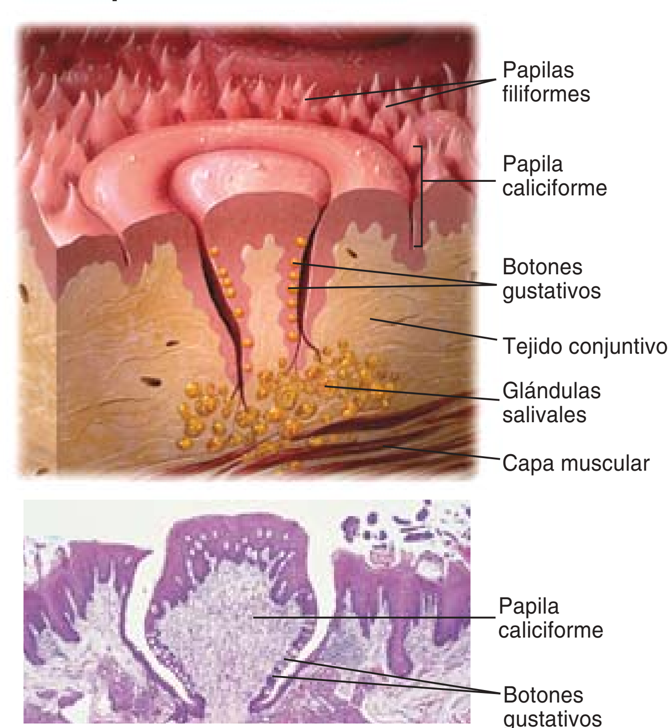
David V. Smith y Robert F. Margolskee

¿Qué sensaciones se experimentan al morder una pegajosa barra de chocolate y caramelo? Es blanda, dulce, cremosa. Al cerrar la boca para tragar, el aroma levemente amargo del chocolate asciende por los conductos nasales. El sentido del olfato, es cosa archisabida, interviene también en la percepción del sabor; lo puede atestiguar cualquiera que haya sufrido un resfriado.

El sabor es una compleja amalgama de la información sensitiva proporcionada por el gusto, el olfato y la sensación táctil que se tiene de la comida cuando se mastica, característica esta que los estudiosos suelen denominar "sensación bucal". La palabra gusto se aplica, en sentido estricto, sólo a las sensaciones que provienen de las células especializadas de la boca, a pesar de que el vulgo emplea indistintamente gusto y sabor. En general, los científicos acotan la percepción humana del gusto a cuatro modalidades: salado, dulce, ácido y amargo. Pero algunos han sugerido la posible existencia de otras categorías. Es el caso del *umami*, variedad gustativa que induce el glutamato, uno de los veinte aminoácidos que forman las proteínas de la carne, del pescado y de las legumbres. El glutamato se utiliza también como potenciador del sabor en el aditivo glutamato monosódico.

Se ha avanzado bastante en la dilucidación del funcionamiento del sentido del gusto. A lo largo de los últimos años, uno de los autores (Margolskee) y otros neurobiólogos han identificado proteínas determinantes para que las células gustativas detecten sustancias dulces y amargas, amén de descubrir que existen proteínas similares implicadas en el sentido de la vista. Otros, entre ellos el grupo dirigido por Smith, coautor del artículo, han observado que las neuronas del cerebro responden a más de un tipo de señal gustativa, de la misma forma que las neuronas que intervienen en el procesamiento de los estímulos visuales originados en la retina pueden reaccionar ante más de un color. Se está haciendo la luz en el mecanismo de operación de uno de los sentidos menos comprendidos.


Salado
Amargo
Dulce
Acido
Umami



1. ANATOMIA DEL GUSTO. Distinguimos en la lengua hasta cuatro tipos de estructuras prominentes denominadas papilas gustativas. En el centro, a la izquierda, se pueden observar la estructura de una papila caliciforme y detalles de los botones gustativos humanos. Unicamente en las papilas caliciformes, foliadas o fungiformes hay botones gustativos. Durante la masticación, las sustancias químicas de la comida entran en los poros de los botones gustativos donde interaccionan, en

Los detectores del gusto

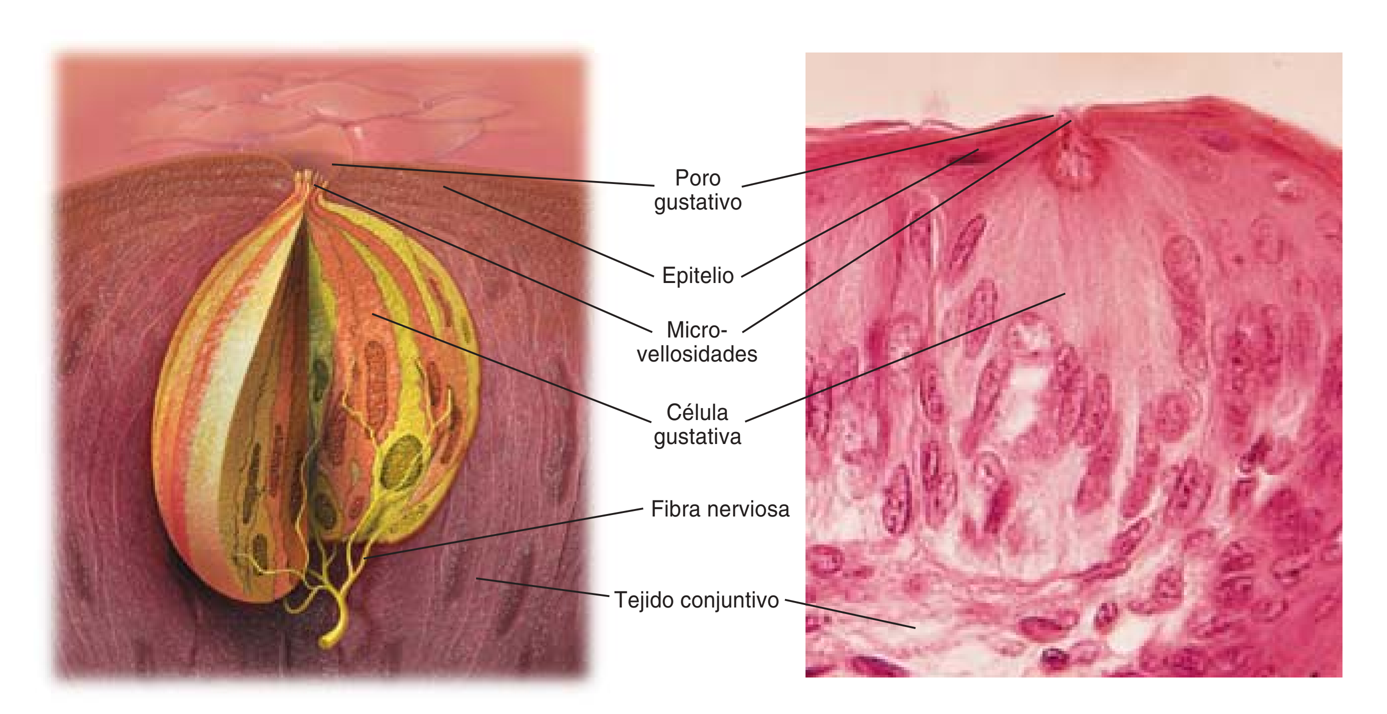
Las células del gusto se encuentran en el interior de unas estructuras especializadas. Los botones gustativos, así se llaman éstas, se alojan sobre todo en la lengua y en el paladar blando. En su mayoría, los botones gustativos de la lengua se hallan, a su vez, dentro de las papilas gustativas, prominencias pequeñas de la lengua que le confieren su aspecto aterciopelado y que se clasifican según su morfología. Las papilas fungiformes, que residen en la parte anterior de la lengua, contienen uno o varios botones gustativos. Son fáciles de identificar, sobre todo después de tomar un vaso de leche o poner una gota de colorante en la punta de la lengua. De mayor tamaño son las papilas caliciformes, que, en número aproximado de doce, están en la parte posterior de la lengua, distribuidas en forma de "V" invertida. Las papilas foliadas crean pequeños surcos en los bordes laterales de la parte posterior de la lengua. Las papilas más numerosas son las filiformes, que, sin embargo, carecen de botones gustativos y están implicadas en la sensación táctil bucal.

Los botones gustativos son estructuras en forma de bulbo con una apertura en su extremo superior, o poro gustativo. Entre cincuenta y cien por botón, las células gustativas presentan unas proyecciones digitiformes, las microvellosidades, que sobresalen del poro gustativo. Las sustancias químicas de la comida se disuelven en la saliva y entran en contacto con las células gustativas a través del poro gustativo. Allí interaccionan con receptores del gusto (proteínas de la superficie de las células) y con proteínas poriformes, los canales iónicos. Estas interacciones desencadenan cambios eléctricos en las células gustativas, que estimulan la emisión de señales químicas, actividad que se traduce en impulsos enviados al cerebro.

El origen de dichas señales yace en la concentración de átomos dotados de carga eléctrica, o iones. Al igual que las neuronas, las células gustativas presentan en reposo una carga neta negativa en su interior y una carga neta positiva en su exterior. Las sustancias químicas de la comida modifican esta situación a través de distintos mecanismos que incrementan la concentración de iones positivos en las células gustativas. El resultado es la supresión de la diferencia de cargas entre el exterior y el interior celular. A esa despolarización se debe el que las células gustativas liberen al exterior neurotransmisores, moléculas que desencadenan en las neuronas en contacto con las células gustativas la transmisión de mensajes eléctricos.

Los estudios realizados en humanos y animales demuestran el carácter variable de la correlación entre las características químicas de las sustancias y la modalidad gustativa asociada, especialmente en el caso de los compuestos amargos o dulces. Muchos carbohidratos son dulces, pero no todos. Además, existe una multiplicidad de tipos de productos químicos que pueden provocar la misma sensación: el cloroformo y los edulcorantes artificiales como el aspartamo o la sacarina suelen considerarse dulces, a pesar de que su estructura química no tenga nada en común con la del azúcar. Por con-

Botón gustativo



la superficie de unas células gustativas especializadas, con ciertas moléculas de las microvellosidades, procesos digitiformes que se proyectan hacia el exterior. La interacción desencadena una serie de cambios electroquímicos en las células gustativas que se traduce en la transmisión de unas señales; éstas terminan por alcanzar el cerebro. Tales impulsos, junto la información recogida por el olfato y aún otras sensaciones táctiles, generan los sabores.

tra, los compuestos que provocan gustos salados o ácidos, menos variables, suelen ser iones.

Los productos químicos asociados a los gustos salado y ácido actúan directamente sobre los canales iónicos. En cambio, los responsables del sabor dulce y amargo se unen a ciertos receptores de la superficie celular que desencadenan una cascada de señales en el interior de las células, cuyo resultado final se manifiesta en la apertura y el cierre de los canales iónicos. En 1992, Susan K. McLaughlin y Peter J. McKinnon, colaboradores de Margolskee, identificaron con éste uno de los miembros clave de la cascada. Lo llamaron gustoducina, dada su similitud molecular con la transducina, una proteína de las células retinianas que ayuda a transformar o transducir la señal luminosa que alcanza la retina en un impulso eléctrico constitutivo de la visión.

La gustoducina y la transducina son proteínas G, que se encuentran unidas a la parte interna de distintos tipos de receptores de superficie. (Se le impuso el nombre de proteína G en razón del trifosfato de guanosina, o GTP, que regula su actividad.) Cuando una molécula gustativa genuina se une a una célula gustativa receptora, con la especificidad de una llave en su cerradura, las subunidades de la gustoducina se separan y catalizan una serie de reacciones bioquímicas que desembocan en la apertura o cierre de canales iónicos. De esta manera, el interior de la célula presenta una carga más positiva.

En 1996 Margolskee y dos más de su equipo, Gwendolyn T. Wong y Kimberley S. Gannon, utilizaron ratones modificados genéticamente por ellos mismos a los que faltaba una de las tres subunidades de la gustoducina. Pretendían demostrar el papel crucial de la proteína G en la identificación del gusto asociado a componentes amargos y dulces. A diferencia de los ratones normales, los ratones modificados no preferían los alimentos dulces, ni evitaban los amargos. No bebían con avidez el agua muy endulzada e ingerían soluciones con componentes muy amargos como si de agua corriente se tratara. Los investigadores observaron también, en los ratones que carecían de la gustoducina, una menor actividad eléctrica en los nervios implicados en respuesta a sustancias dulces y amargas. La actividad ante la presencia de productos salados y ácidos se mantenía en la forma habitual.

Dos grupos, liderado uno conjuntamente por Charles S. Zuker, del Instituto Howard Hughes de Medicina en la Universidad de California en San Diego, y por Nicholas J. Ryba, del Instituto Nacional de Investigación Dental y Craneofacial, y el otro por Linda B. Buck, de la facultad de medicina de la Universidad de Harvard, identificaron el año pasado en ratones y humanos los verdaderos receptores vinculados al sabor amargo y que activan la gustoducina. Ambos equipos descubrieron que los receptores T2R/TRB pertenecían a la familia de unos receptores semejantes integrada quizá por entre 40 y 80 miembros.

El grupo de Zuker y Ryba insertó los genes que codifican dos de los receptores gustativos de estos ratones, el mT2R5 y el mT2R8, en células de cultivo y descubrió que las células modificadas se activaban en

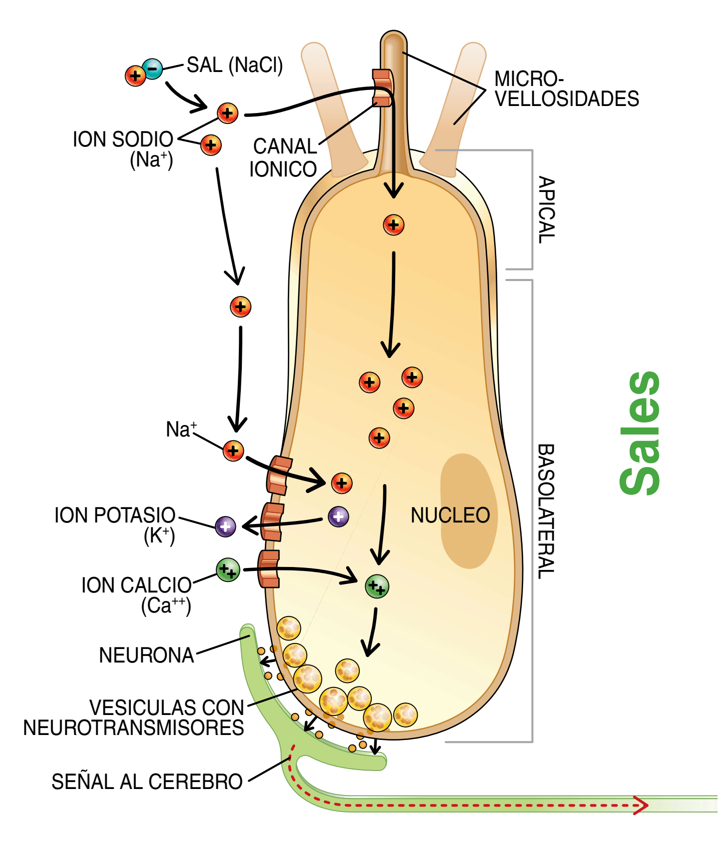
Los sabores básicos

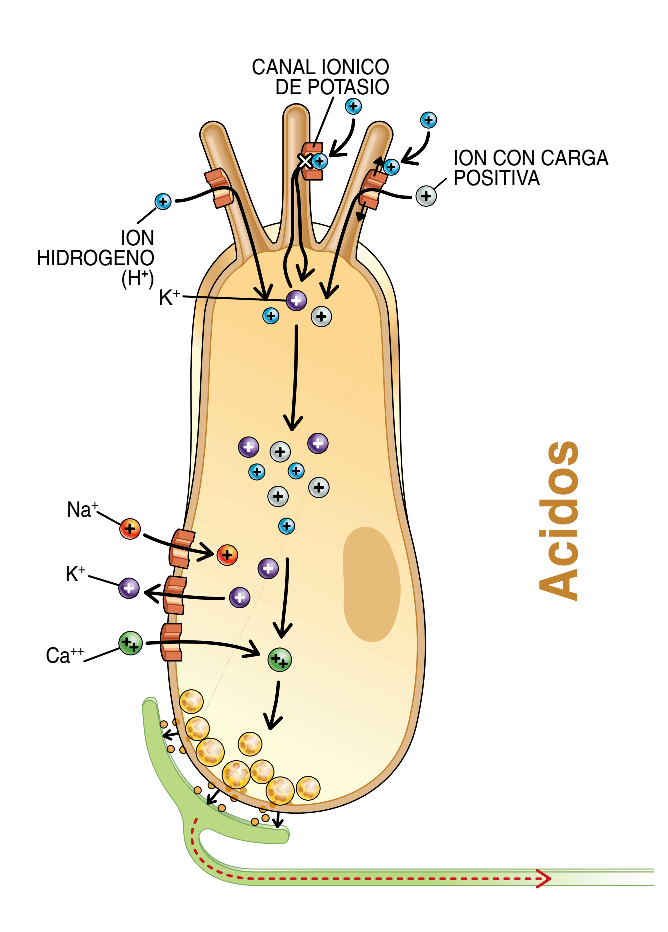
Los estímulos interpretados por el cerebro como modalidades básicas del gusto (salado, ácido, dulce, amargo y, posiblemente, *umami*) desencadenan una serie de reacciones químicas en las células gustativas de los botones gustativos. Las cinco vías bioquímicas asociadas a cada modalidad se muestran por separado y en distintas células gustativas para mayor claridad de exposición. En realidad, las células gustativas no están programadas, diríase afinadas, para un único tipo de estímulo gustativo.

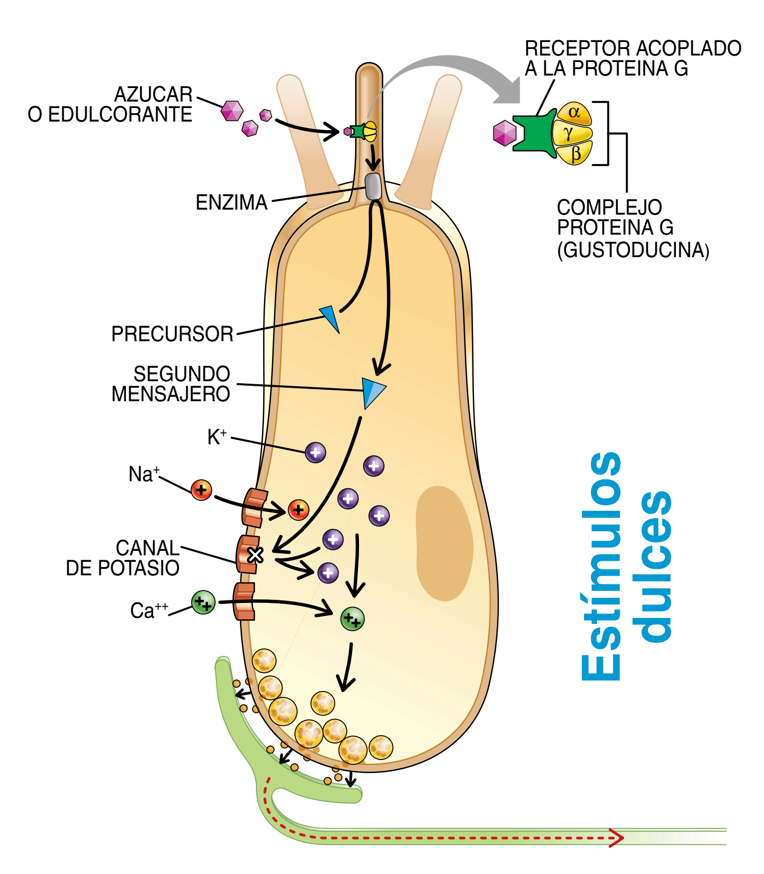
LAS SALES, como el cloruro sódico (NaCl), activan a las células gustativas cuando los iones de sodio (Na^+) atraviesan los canales iónicos y penetran en las microvellosidades situadas en la superficie apical de la célula. Los iones de sodio pueden también entrar a través de los canales situados en la superficie basolateral de la célula. La acumulación de estos iones provoca un cambio electroquímico, una despolarización, que resulta en la entrada de iones de calcio (Ca^{++}) en la célula. El calcio, a su vez, incita a la célula a liberar neurotransmisores, mensajeros químicos almacenados en vesículas. Las neuronas reciben el mensaje y transmiten la señal al cerebro. Las células gustativas vuelven a su estado previo, se repolarizan, mediante una serie de reacciones; entre ellas, la apertura de canales iónicos de potasio para facilitar la salida de los iones de potasio (K^+).

LOS ACIDOS ofrecen tal sabor porque generan iones de hidrógeno (H^+) en disolución. Estos iones actúan de tres maneras en la célula gustativa: entran directamente en la célula gustativa, bloquean los canales de potasio (K^+) de las microvellosidades y se unen a los canales de las microvellosidades produciendo su apertura para permitir la entrada de otros iones con carga positiva. La acumulación de cargas positivas despolariza la célula y desencadena la liberación de neurotransmisores.

LOS ESTIMULOS DULCES, como el azúcar o los edulcorantes sintéticos, no entran en las células gustativas, pero desencadenan cambios en el interior de las mismas. Se unen a unos receptores, situados en la superficie de la célula gustativa, que están conectados a proteínas G. Cuando esto sucede, las subunidades (α, β y γ) de la proteína G se escinden en dos subunidades funcionales α y $\beta\gamma$ que activan una enzima próxima. Seguidamente, la enzima convierte a ciertas moléculas precursoras del interior de la célula en lo que se conoce como segundos mensajeros que, de forma indirecta, cierran los canales de potasio.







DAVID V. SMITH y ROBERT F. MARGOLSKEE estudian el sentido del gusto desde ángulos complementarios. Smith es profesor y subdirector del departamento de anatomía y neurobiología de la facultad de medicina de la Universidad de Maryland desde 1994 y miembro del programa de neurociencia. Margolskee, adscrito al Instituto Howard Hughes de Medicina, enseña fisiología y farmacología en la facultad de medicina de Mount Sinai.

presencia de dos compuestos amargos.

Los investigadores hallaron que, en determinadas cepas de ratones, una versión del gen *mT2R5* tendía a transmitirse conjuntamente con la capacidad de percibir el gusto amargo propio del antibiótico cicloheximida, un indicio más de que los genes de los receptores T2R eran responsables de la identificación de las sustancias amargas. Se buscan ahora los receptores que reconocen sustancias dulces.

Se estudia, además, el posible receptor responsable de un gusto que los japoneses llaman *umami*, de difícil traducción, tal vez carnoso o sustancioso. En 1998 Nirupa Chaudhari y Stephen D. Roper, de la Universidad de Miami, aislaron en tejido de rata un receptor que se une al glutamato y postularon que era el responsable de la modalidad del gusto *umami*.

Otros investigadores observan con escepticismo que el *umami* sea el quinto sabor básico, tan significativo como el dulce, el salado, el ácido y el amargo. Pese a que el sabor del glutamato pueda ser una sensación única, sólo los japoneses tienen una palabra para designarlo.

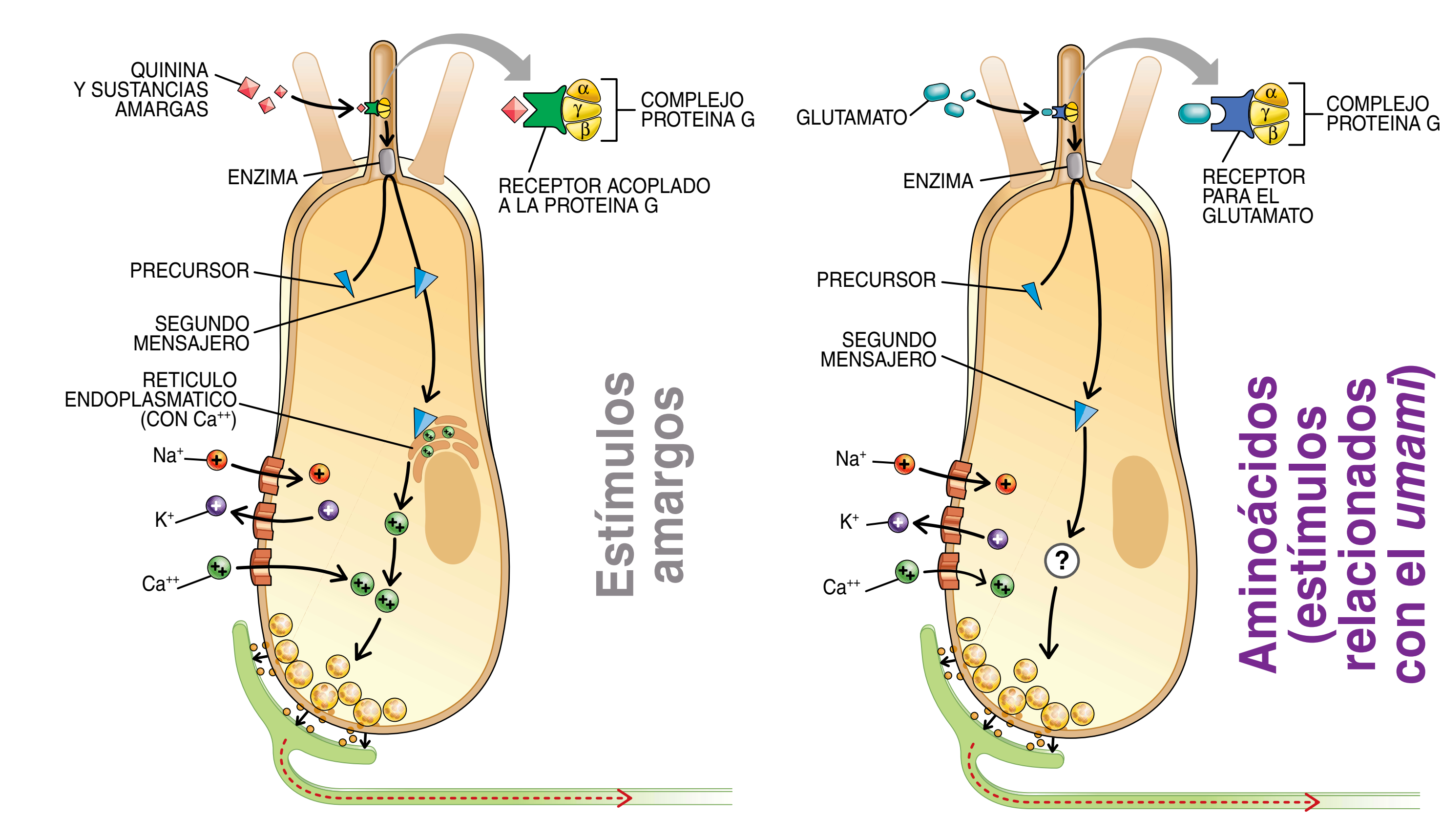
Pero el sentido del gusto es mucho más complejo que unos simples receptores para los cuatro (o cinco) sabores básicos y las interacciones químicas que generan en las células gustativas. A pesar de nuestra tendencia a identificar la información del gusto en términos de modalidades (salado, ácido, dulce y amargo), el sistema gustativo también interpreta otros atributos derivados de los estímulos químicos. Un sabor intenso puede ser placentero, desagradable o neutro. Las neuronas de la vía del gusto registran estos atributos de forma simultánea, a la manera en que el sistema visual representa la figura, el brillo, el color y el movimiento. Con harta frecuencia, las neuronas del gusto responden también a estímulos táctiles y térmicos.

Sentido del gusto y cerebro

Durante mucho tiempo fue objeto de debate si las neuronas estaban programadas de suerte tal que cada una de ellas reaccionara frente a una única sustancia, como la sal o el azúcar —identificando así una sola variedad gustativa—, o si se requería la actividad de cada neurona para la percepción de más de una varie-

LOS ESTIMULOS AMARGOS, como la quinina, también actúan a través de los receptores de acoplamiento de la proteína G y de segundos mensajeros. En este caso, sin embargo, los mensajeros secundarios instan la liberación de iones de calcio del retículo endoplasmático. La acumulación de calcio resultante en la célula conduce a la despolarización y subsiguiente liberación de neurotransmisores.

LOS AMINOACIDOS, como el glutamato, responsable de la variedad gustativa conocida como *umami*, se unen a los receptores de acoplamiento de la proteína G y activan a los segundos mensajeros. No se conocen aún las reacciones en cuya virtud los segundos mensajeros conducen a la liberación de los paquetes de neurotransmisores.



De gustos y conductas

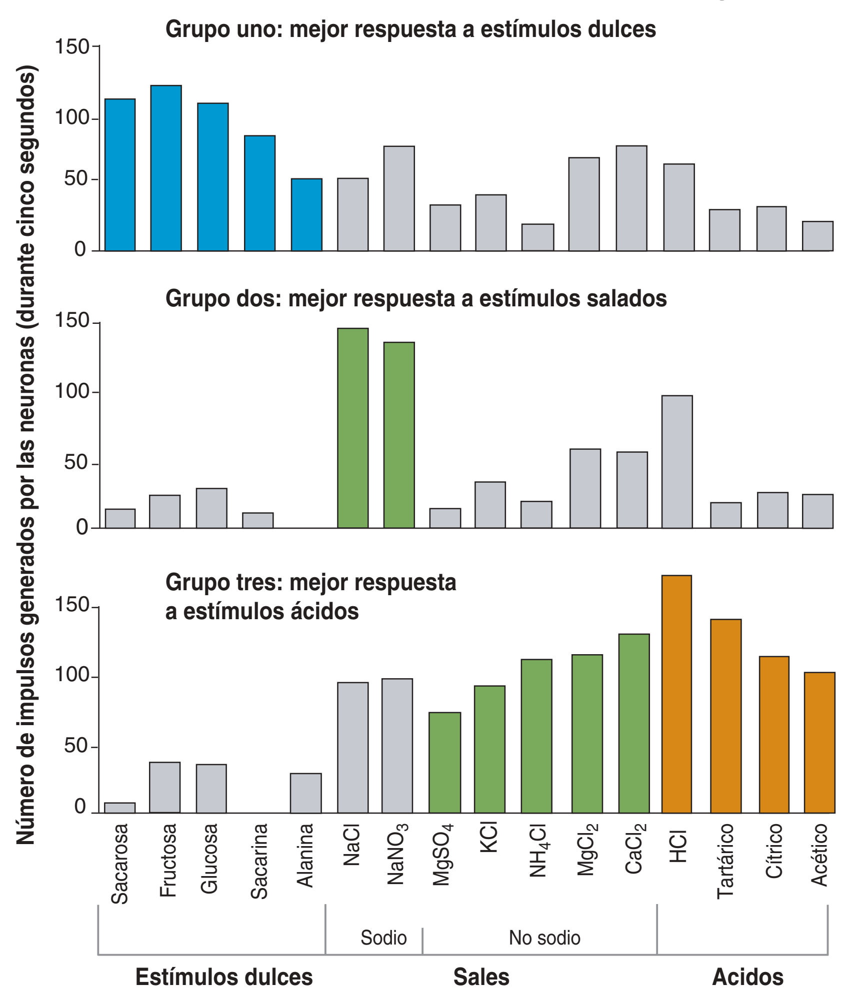
La información sensorial de las células gustativas es clave para ayudarnos a detectar y a responder de forma adecuada a nuestras necesidades nutritivas. El sabor dulce de los azúcares, por ejemplo, potencia la ingesta de carbohidratos. Las señales gustativas provocan también respuestas fisiológicas, como la liberación de insulina, que facilita una utilización efectiva de los nutrientes ingeridos. Ante la falta de sodio, animales y humanos buscan en su ingesta las fuentes de sodio. De acuerdo con los resultados experimentales, las personas y los animales con deficiencias dietéticas tienden a ingerir alimentos con alto contenido en vitaminas y minerales.

La evitación de sustancias dañinas reviste, cuando menos, idéntica importancia que la ingesta de alimentos apropiados. El carácter universal del rechazo que provocan las moléculas intensamente amargas demuestra la estrecha conexión entre gusto y repugnancia. Los compuestos tóxicos, como la estricnina y otros alcaloides comunes entre las plantas, muestran a menudo un fuerte sabor amargo. De hecho, muchas plantas han desarrollado dichos componentes para protegerse de los herbívoros. El sabor ácido propio de los alimentos estropeados contribuye a su rechazo. Todos los animales rechazan en general las sustancias de sabor ácido o amargo, salvo en concentraciones mínimas.

Las intensas reacciones de placer y repugnancia provocadas por las sustancias dulces y amargas ya están presentes en el momento del nacimiento y parecen depender de conexiones nerviosas del tronco encefálico inferior. Tanto en neonatos anencefálicos, que carecen de prosencéfalo, como en animales a los que el prosencéfalo se ha desconectado de otras estructuras nerviosas mediante cirugía, se observan las respuestas faciales que se asocian con el placer y la repugnancia frente a estímulos dulces y amargos, respectivamente.

El sólido nexo entre gusto y placer es la base del fenómeno del aprendizaje a la aversión a ciertos sabores. Los animales, incluidos los humanos, aprenden rápidamente a evitar un alimento nuevo si causa, o se relaciona con molestias gastrointestinales. El aprendizaje de la aversión gustativa, sea natural o inducido de forma experimental, puede derivar de una asociación de sustancia y enfermedad, aun cuando medie un lapso de varias horas entre ambas. Uno de los efectos secundarios de los tratamientos con radiación y quimioterapia en los pacientes cancerosos es la pérdida del apetito. En gran medida, se debe a aversiones gustativas más condicionadas que favorecidas por las molestias gastrointestinales producidas por estos tratamientos. Por culpa de ese mecanismo ha resultado harto complicado desarrollar un veneno efectivo para el control de las ratas, especialmente diestras a la hora de asociar sabores nuevos y sus consecuencias fisiológicas.

Medida de las preferencias de las neuronas gustativas



2. LOS EXPERIMENTOS sobre la actividad neuronal han demostrado que las neuronas gustativas se excitan en presencia de distintos tipos de estímulos gustativos —ya sean dulces, salados, ácidos o amargos—, a pesar de que las células suelan responder con mayor intensidad a un tipo. No se muestran los estímulos amargos.

dad gustativa. Son muchos los estudios, como los realizados por uno de los autores (Smith), que demuestran que las neuronas gustativas periféricas y las centrales responden de una manera característica ante más de un tipo de estímulo. Si bien cada neurona responde de un modo más intenso ante una sustancia determinada, en general suelen observarse respuestas ante estímulos relacionados con variedades gustativas distintas.

¿Cómo puede entonces interpretar el cerebro las distintas modalidades gustativas, si cada neurona responde a varios estímulos de sabores diferentes? Muchos investigadores están convencidos de que la diferenciación sólo es posible a partir de los diversos patrones de actividad de un nutrido conjunto de neuronas.

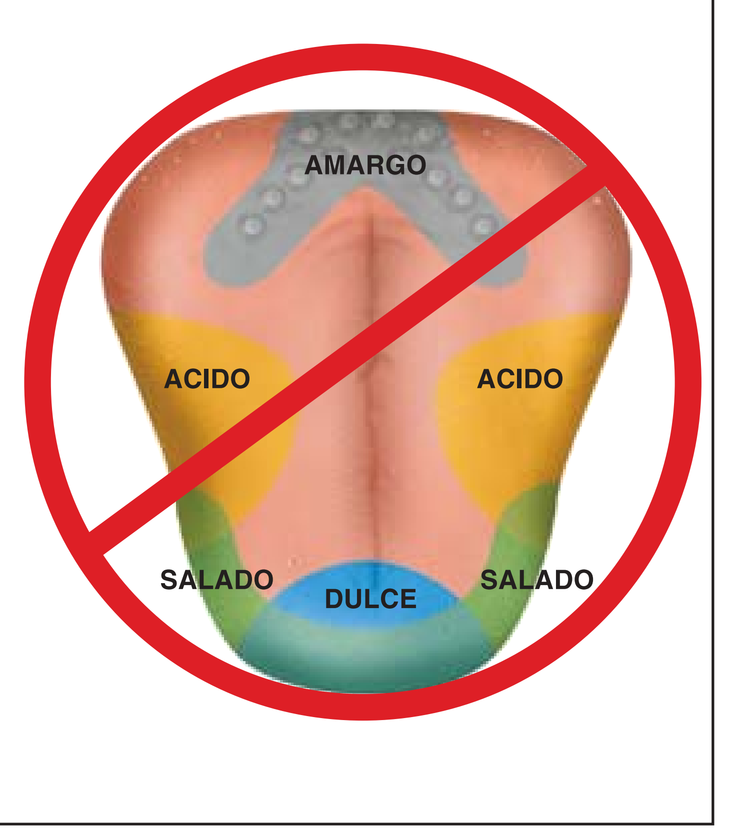
Este planteamiento conduce a los investigadores del sentido del gusto a recuperar una teoría antigua. Los primeros estudios electrofisiológicos de neuronas sensoriales gustativas

Un “mapa del gusto” completamente falso

Una de las informaciones más dudosas sobre el sentido del gusto, que se cita con frecuencia y se reproduce de un modo habitual en los libros de texto, es un falso mapa de la lengua que muestra grandes diferencias sensoriales en distintas regiones de la misma. Así, los botones gustativos situados en la punta de la lengua detectarían el sabor dulce, los laterales el ácido, los situados en la parte posterior el amargo, y los instalados en los bordes anteriores, el salado.

Hace años que los investigadores del sentido del gusto saben que estos mapas de la lengua no son correctos. Aparecieron a principios del siglo XX como consecuencia de una interpretación equivocada de investigaciones realizadas en el siglo XIX.

La verdad es que todas las variedades del gusto pueden detectarse en todas las regiones de la lengua que contienen botones gustativos. Hasta el momento, no existe ningún indicio de que cualquier tipo de segregación espacial de la sensibilidad contribuya a la percepción de las modalidades gustativas, a pesar de que existen ligeras diferencias sensoriales en la lengua y el paladar, sobre todo en los roedores.



“MAPA DE LA LENGUA” que persiste en muchos libros de texto, a pesar de que se basa en una interpretación errónea de investigaciones realizadas en el siglo XIX.

realizados a principios de los años cuarenta del siglo XX por Carl Pfaffmann, de la Universidad Brown, demostraron que las neuronas periféricas no respondían específicamente ante estímulos relacionados con una sola modalidad del gusto, sino que recogían todo un espectro de sensaciones gustativas. Pfaffmann sugirió que la modalidad del gusto podría estar representada por el modelo de actividad entre las neuronas gustativas, habida cuenta de la ambigüedad de la actividad de cada célula. A lo largo de los años setenta y ochenta, se fueron acumulando datos que indicaban que cada neurona hallaba máxima sintonía con una modalidad gustativa. Se pensó entonces que la actividad observada en un determinado tipo de células se asociaba con una modalidad gustativa dada, una hipótesis que se conocería como la de la serie etiquetada. De acuerdo con tal hipótesis, la actividad de las neuronas que se excitaran de forma preferente ante la presencia de azúcar se asociaría a sensación de dulce, la actividad de las que respondieran preferentemente a los ácidos indicaría ácido, etcétera.

En 1983 Smith y sus colaboradores Richard L. Van Buskirk, Joseph B. Travers y Stephen L. Bieber demostraron que las mismas células que otros habían interpretado como series etiquetadas eran responsables de las similitudes y diferencias en el patrón de actividad de las neuronas gustativas. De esta forma, las mismas neuronas eran responsables de la representación de la modalidad del gusto, con independencia de que se consideraran células etiquetadas o elemento diferenciador de un patrón entre neuronas. Los investigadores demostraron que la distinción neuronal entre estímulos de diferentes modalidades dependía de la activación simultánea de los distintos tipos de células, lo mismo que la visión del color dependía de la comparación de la actividad entre las células fotorreceptoras del ojo. Estas y otras consideraciones nos han conducido a apoyar la idea de que los patrones de actividad son clave para codificar la información del gusto.

Sabemos ahora que los productos que tienen un gusto parecido provocan modelos de actividad similares entre los grupos de neuronas del sistema. Aún más, podemos comparar estos patrones y realizar análisis estadístico multivariante para extraer las similitudes de esos patrones. Se han abordado tales comparaciones gráficas de los estímulos gustativos a partir de la respuesta neuronal en hámsters y ratas y se ha observado su enorme parecido con gráficos similares obtenidos en experimentos realizados en el área del comportamiento. A partir de estos estudios, se han inferido qué estímulos se asocian con variedades gustativas parecidas y diferentes en esos animales. Demuestran los datos que los patrones de actividad entre neuronas contienen la información necesaria para la discriminación entre modalidades del gusto.

Cuando se bloquea la actividad de determinados grupos de neuronas, desaparece la discriminación conductual entre los estímulos, así en la diferenciación entre el cloruro sódico, la sal común, y el cloruro potásico. Una demostración empírica de lo anterior puede obtenerse si se trata la lengua con amilorida, un diurético. Thomas P. Hettinger y Marion E. Frank, del Centro de Ciencias de la

Salud de la Universidad de Connecticut, demostraron que la amilorida reducía la actividad de algunos tipos de neuronas gustativas periféricas, pero no de otras. Este diurético bloquea en las células de los receptores gustativos los canales de sodio de las membranas apicales, que son las membranas que están junto a la apertura del poro gustativo y ejerce su influencia de forma principal en neuronas que responden preferentemente al cloruro sódico.

Smith y su colaborador Steven J. St. John demostraron recientemente que el tratamiento con amilorida elimina las diferencias entre el cloruro sódico y el cloruro potásico en el patrón de actividad neuronal de las ratas. A tenor de la respuesta conductual de las ratas, elimina también su capacidad para diferenciar estos estímulos, tal como ha puesto de relieve el grupo de Alan C. Spector, de la Universidad de Florida. Aunque de un modo completamente distinto, la reducción de la actividad en otros tipos de células suprime las diferencias de los patrones de actividad neuronal por estas sales. De tal investigación se desprende que es la comparación de la actividad entre las células la responsable de la discriminación de los sabores y no un tipo celular específico. De la actividad relativa de distintos tipos de neuronas depende, pues, la discriminación de las variedades gustativas; cada tipo neuronal contribuye al conjunto del patrón de actividad para distinguir entre estímulos dispares.

Debido a la variabilidad de la respuesta de las neuronas gustativas, hemos de comparar los niveles de actividad de un conjunto de ellas para hacernos una idea de cuál sea la sensación que perciben. Si una célula determinada puede responder igual ante estímulos dispares, en función de sus concentraciones relativas, un solo tipo de neurona no será capaz por sí mismo de distinguir entre estímulos de variedades gustativas diferentes. En este aspecto el gusto es como el sentido de la vista, donde tres tipos de fotorreceptores responden a la luz de un amplio abanico de longitudes de onda para permitir la visión de los matices de color del arco iris. La carencia de uno de estos pigmentos de los fotorreceptores impide la discriminación del color, impedimento que podría muy bien extenderse a las longitudes de onda para las cuales ese receptor es el más sensible. En breve, no cabe la discriminación entre estímulos rojos y verdes si el individuo se halla privado del fotopigmento rojo o verde.

Pese a que esta analogía con la percepción de los colores permite una explicación razonable de la codificación neuronal del gusto, se debate todavía si el papel de los tipos neuronales en la codificación del gusto supera en importancia el desempeñado en la vista. Queda por dilucidar si el gusto es un sentido analítico, cada variedad se percibiría de forma independiente, o sintético, las distintas variedades se combinarían en una única percepción, como es el caso de la vista. La determinación de la relación entre la actividad de estas neuronas con una amplia variabilidad de respuesta y las sensaciones desencadenadas por las mezclas de variedades gustativas constituye un verdadero desafío para el esclarecimiento del funcionamiento de dicho sistema.

Los avances experimentales en la investigación del sentido del gusto, pensemos en el aislamiento de proteínas de células gustativas o en la representación nerviosa de los estímulos gustativos y la percepción de las variedades gustativas, permitirán una visión más completa del funcionamiento del sentido del gusto en el hombre. Estos conocimientos alentarán el descubrimiento de nuevos edulcorantes artificiales y el desarrollo de sustitutivos de la sal y las grasas. En resumen, el diseño de alimentos y bebidas más sanos, de un sabor delicioso.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE GUSTATORY SYSTEM. Ralph Norgren en *The Human Nervous System*. Dirigido por George Paxinos. Academic Press, 1990.

TASTE RECEPTION. Bernd Lindemann en *Physiological Reviews*, vol. 76, n.º 3, págs. 718-766; julio 1996.

NEURAL CODING OF GUSTATORY INFORMATION. David V. Smith y Stephen J. St. John en *Current Opinion in Neurobiology*, volumen 9, n.º 4, páginas 427-435; agosto 1999.

THE MOLECULAR PHYSIOLOGY OF TASTE TRANSDUCTION. T. A. Gilbertson, S. Damak y R. F. Margolskee en *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 10, n.º 4, págs. 519-527; agosto 2000.

Evolución de los lagartos del Caribe

Jonathan B. Losos

A tenor de lo observado en algunas islas del Caribe, la evolución podría haber seguido una misma trayectoria en diversas ocasiones



Por doquier de las Antillas Mayores podemos hallar lagartos del género *Anolis*. En las copas de los árboles y a lo largo de sus troncos, entre la hojarasca del suelo, encaramados en los postes de vallas o en la proximidad de las flores. Los hay de toda guisa y condición: cortos, largos, azules, pardos, verdes o grises, buenos saltadores y pésimos, grandes y retadores, lentos y cautelosos. Esa increíble diversidad convierte a los anolis en motivo fascinante de estudio. Porque tras ese caleidoscopio de formas y de hábitats se esconde la clave de un misterio biológico crucial: ¿en virtud de qué la evolución de un animal toma una senda determinada y no otra?

Cualquier visitante de las islas percibirá en seguida que las especies de anolis que se encuentran juntas —que son simpátricas— difieren en el medio donde medran. Esta especie, por ejemplo, aparece siempre sobre hierba, aquella otra sobre ramitas sólo, una tercera cabe la base de los troncos de árboles, aunque a veces se aventure sobre el suelo. Las tres difieren también por su morfología. La especie que mora en la hierba es más delgada y tiene la cola larga; la que vive sobre las ramitas, aunque asimismo esbelta, tiene las patas rechonchas; por fin, el tercer lagarto se distingue por su robustez y largas patas.

Pero en esas especies cohabitantes no nos llama la atención ni su morfología dispar ni el reparto de su medio. Bien mirado, tales diferencias constituyen la norma en especies estrechamente emparentadas y simpátricas. Los pinzones de Darwin que viven en las islas Galápagos y los lémures



1. LAGARTOS ANOLIS de las islas del Caribe. Forman un grupo variopinto. En las Antillas Mayores han evolucionado unas 110 especies, que ocupan casi todos los nichos ecológicos, desde el gigante del dosel que vive en las copas de los árboles hasta el anolis colilargo, que medra entre la hierba.

de Madagascar ofrecen dos ejemplos famosos de animales que se adaptaron a todos los nichos disponibles. Lo insólito de los anolis caribeños es otra cosa: en cada isla nos encontramos con los mismos tipos de especialistas en los diversos hábitats. Si el viajero recala en Puerto Rico y observa la especie de las ramitas que allí vive, puede trasladarse luego al resto de las Antillas Mayores —Cuba, La Española (que comprende Haití y la República Dominicana) y Jamaica— para encontrar, en cada una de esas islas, una especie que parece casi idéntica, medra en el mismo tipo de hábitat y se comporta de una manera similar. Añádase que las cuatro islas poseen, además, un especialista de la base de los árboles, otro arbóreo y un gigante de la bóveda forestal. Prosigamos. En tres de las islas existen especialistas de hierba, y en dos, especialistas de troncos (con un cuerpo más plano y una cola más corta que los lagartos propios de la base de los árboles).

Los naturalistas están acostumbrados a descubrir especies similares en nichos ecológicos parecidos, de diferentes partes del mundo. El gato marsupial y el lobo marsupial de Australia recuerdan, en su morfología y ecología, a sus sosias felinos y caninos de otros continentes. Pero la convergencia de comunidades enteras es ya harina de otro costal. Aunque las comunidades de áreas distintas ofrecen a menudo ciertos paralelismos, tal parangón no existe para la presencia de comunidades compuestas del mismo conjunto de especialistas ecológicos.

No basta con una vez

La existencia de tales comunidades requiere que haya algún proceso determinista, capaz de modelar su estructura. Algo que guíe la evolución de los lagartos por la misma senda, una y otra vez. Mis colegas y yo hemos venido sometiendo a prueba esa hipótesis. Para ello, hubo que comprobar los tres supuestos en que se funda: que los especialistas evolucionaron de manera independiente en cada isla, que los lagartos se hallan adaptados a sus nichos ecológicos particulares y que en cada isla operan procesos ecológicos y evolutivos similares. A lo largo de los últimos 20 años ha crecido enormemente el armamentario de la biología evolutiva, lo que nos ha permitido acudir a muchas disciplinas para abordar las cuestiones planteadas. Sirviéndonos del registro fósil, observaciones de campo, experimentos y secuenciación de ADN, hemos empezado a vislumbrar qué está ocurriendo con los anolis de las Antillas Mayores.

Para explicar la presencia de especies similares en islas diferentes pueden esgrimirse razones muy diversas. Así, pudo darse que una especie ancestral explotara un determinado nicho ecológico en una isla y se abriera luego paso sobre el agua (quizá sobre almadías o arrastrada por los huracanes) para colonizar otras islas. Cabe también que este especialista ancestral evolucionara en una época en que las islas persistían unidas, lo que pudo haber ocurrido con algunas islas del Caribe. Producida después la discontinuidad insular, las poblaciones de lagartos, aisladas, se habrían convertido en especies distintas, al tiempo que conservaban las adaptaciones de sus antepasados. Ambos modelos de explicación exigen que la especialización en cada nicho se produjera una sola vez. A tenor de una tercera posibilidad, cada especialista surgiría de manera independiente (o de forma convergente) en cada una de las Antillas Mayores.

Para determinar cuál de esta triple posibilidad aconteció en realidad hemos de examinar el árbol evolutivo, la filogenia, de los anolis del Caribe. Si cada tipo de especialista evolucionó de una vez por todas, entonces los que cumplieran funciones similares en las diferentes islas guardarían un estrecho parentesco. Pero si los especialistas en cuestión siguieron su propia vía evolutiva independiente en cada isla, entonces los especialistas similares en islas distintas no se hallarían estrechamente emparentados. En este último caso, un especialista de una isla mostraría un parentesco más cercano con otros tipos de lagartos de la misma isla, al margen de su nicho ecológico, que con los que utilizan nichos similares en islas distintas. Así, un habitante de las ramitas en Jamaica tendría un mayor parentesco con los lagartos de las bases o de las copas de los árboles de la misma isla que con un morador de las ramitas de Cuba.

De la comparación entre secuencias de ADN de un mismo gen o de unos mismos genes en especies diferentes, los biólogos extraen inferencias sobre el grado de parentesco entre especies, desde el punto de vista evolutivo. Aunque se disputa cuál sea el mejor método para deducir relaciones filogenéticas a partir de comparaciones de ADN, los investigadores están de acuerdo en que las especies que evidencian un ADN más parecido son, en la mayoría de los casos, más próximas también entre

JONATHAN B. LOSOS, que estudia las causas y consecuencias de la diversificación evolutiva, enseña en la Universidad de Washington, cuyo Centro de Investigación Tyson dirige.

2. LAS ANTILLAS MAYORES comprenden las islas de Cuba, La Española (Haití y la República Dominicana), Puerto Rico y Jamaica. Cada una de ellas cuenta con un anolis que ha evolucionado para vivir básicamente sobre ramitas.



CUBA



sí que con respecto a otras especies cuyo ADN diverge más. Por citar un ejemplo conocido: los seres humanos y los chimpancés, que comparten una gran cantidad de su ADN, tuvieron un antepasado común en fecha mucho más reciente que el precedente común de humanos y papiones, que comparten menos ADN.

Con ese enfoque, Todd R. Jackman, Allan Larson y Kevin de Queiroz secuenciaron varios genes procedentes de más de 50 especies de anolis. Los datos no dejan lugar a la ambigüedad: los especialistas de hábitat de una isla no se hallan estrechamente emparentados con los que medran en un entorno idéntico en las otras. De acuerdo con nuestros resultados, los especialistas evolucionaron de manera independiente en cada isla. Más aún: en cada isla siguieron una trayectoria evolutiva independiente comunidades parecidas.

El registro fósil

Con frecuencia el registro fósil puede corroborar tales conclusiones. Mas, salvo para especímenes de los últimos miles de años, escasean los fósiles de anolis. No habrá allende una docena, incluidos todos en ámbar. Presumiblemente, estos lagartos quedaron pegados a la resina que rezumaba de árboles antiguos que cayeron al suelo y fosilizaron. Pero la mayoría de los fósiles guardados en ámbar pertenecen a colecciones privadas, que no suelen facilitar su investigación. No obstante, hemos examinado dos especímenes encontrados en La Española, que datan del período Mioceno, de hace unos 20 millones de años. Los ejemplares resultan indistinguibles de los actuales especialistas del hábitat de la bóveda arbórea; nos confirman que la especialización de hábitat en los anolis constituye un fenómeno que viene de antiguo.

La evolución convergente en situaciones similares sugiere que las características han emergido en respuesta a problemas parecidos que plantea el ambiente. Para comprobar esta posibilidad hemos de comprender por qué una característica concreta se ve privilegiada en determinadas circunstancias. Sea, por ejemplo, la longitud de la pata. Los anolis caribeños de las ramitas poseen patas muy cortas; los que ocupan la parte inferior de los troncos, las extremidades muy largas. Para saber si la longitud de las patas evolucionó en respuesta a diferencias en el diámetro de la superficie, necesitamos dos tipos de información. Hemos de descubrir cuáles son las consecuencias funcionales que se derivan de las diferencias en la longitud de las patas, y hemos de reunir datos sobre la importancia de dichas diferencias para el comportamiento y el uso del hábitat por parte de dichas especies.

Para obtener la información de marras combinamos métodos de laboratorio y de campo. En el laboratorio, investigamos las capacidades funcionales centrándonos en parámetros de interés ecológico, tales como la celeridad con que puede correr un lagarto o su prensilidad. Algunos de tales estudios requirieron el concurso de un equipo electrónico complejo. Por ejemplo, para registrar cuán rápido puede correr un lagarto construimos una pista de carreras adecuada: un camino estrecho de dos metros de longitud con rayos y detectores infrarrojos situados cada cuarto de metro. Por lo general, los lagartos dejados en un extremo de la pista salían corriendo rápidamente hacia el saco oscuro situado en el extremo opuesto. Para determinar su capacidad prensil, colocábamos a los lagartos en una placa vertical, muy sensible, que mide la fuerza que sus almohadillas digitales generan cuando el animal intenta mantener su posición mientras el experimentador tira de él hacia abajo.

De menor refinamiento técnico era el otro equipo con que trabajábamos. Para medir el salto máximo de que eran capaces, colocábamos a los lagartos en una tabla plana a 30 centímetros sobre el suelo. Azuzados con golpecitos que les dábamos en la cola, saltaban y medíamos la longitud abarcada.

Los experimentos nos confirmaron buena parte de lo que cabía esperar. Tomados en consideración los efectos atribuibles a las diferencias de talla corporal, resulta manifiesto que la capacidad de correr y la de saltar guardan relación con la longitud de las patas posteriores. Una conclusión predecible, pues los lagartos de patas largas efectúan ambladuras más largas y alcanzan velocidades mayores durante la primera parte del salto. Y en el mismo orden, cuanto mayores las almohadillas de los dedos, tanto mayor la capacidad prensil.

Pero los ensayos trajeron alguna que otra sorpresa. La más notable: la relación entre longitud de la pata y velocidad a la carrera depende de la superficie por donde corra el lagarto. Si se acorta el diámetro de la superficie, decrece también la ventaja asociada a las patas más largas. *Anolis gundlachi*, especialista de la base de los troncos y lagarto de largas patas de Puerto Rico, dobla, en superficie plana, la velocidad que alcanza *A. valencienni*, una especie jamaicana de ramitas y patas cortas. Pero la velocidad de *A. gundlachi* se reduce notablemente al reducirse el diámetro de la superficie. En angostas superficies de un centímetro de diámetro, ambas especies corren con la misma lentitud, no obstante la diferente longitud de sus patas. Pero

mientras el anolis de las ramitas se mueve con paso seguro sobre superficies de cualquier anchura, la especie patilarga tropieza o se cae a menudo en superficies estrechas.

Esta capacidad funcional dispar apoya la idea de la evolución de las diferencias morfológicas para adaptarse a nichos ecológicos distintos. Ahora bien, para establecer si tales capacidades confieren alguna ventaja real, no queda otro remedio que observar a los animales en su medio natural. Tras laboriosos trabajos de campo, realizados sobre todo por Duncan Irschick, se ha revelado que los anolis saltan casi siempre distancias bastante más cortas que las máximas capacidades exhibidas en el laboratorio. De lo que se deduce que resulta inverosímil que la evolución hacia la adquisición de patas largas se haya producido en respuesta a la selección para un salto mayor.

A menudo, en cambio, los anolis corren a la máxima velocidad, sobre todo si huyen de los depredadores. Las especies más dadas a correr son las que tienen una mayor capacidad para la carrera y patas más largas. Las especies de patas cortas raramente corren; acechen a la presa o eludan a los depredadores, adoptan la estrategia contraria y, así, se mueven subrepticiamente para evitar ser detectadas. Dada su falta de velocidad, la seguridad en el paso reviste particular importancia, porque un lagarto que se cae tiene muchas probabilidades de despertar la atención y, una vez detectado, corre mayor riesgo de ser atrapado.

Plasticidad y selección natural

Constituye un raro privilegio poder observar actuante la selección natural; es decir, ver *in fieri* la adaptación de un organismo a un nuevo hábitat y el desarrollo de una especialización, por ejemplo, la de patas cortas y seguras. En la mayoría de las ocasiones, la evolución procede a una escala temporal que escapa a la observación humana. Pero un experimento iniciado a finales de los setenta del siglo XX por Thomas y Amy Schoener nos abrió un portillo a ese proceso. Tras advertir la ausencia de anolis en algunas islas muy pequeñas de las Bahamas, los Schoener introdujeron el anolis pardo, *A. sagrei*, en 20 islas para estudiar el proceso de extinción. Para su sorpresa, la población sobrevivió e incluso medró en todas las islas, salvo las menores. (Los Schoener atribuyeron la ausencia de lagartos a los huracanes ocasionales, idea que se confirmó en 1996, cuando el Lili barrió las poblaciones de lagartos de muchas islas pequeñas.)

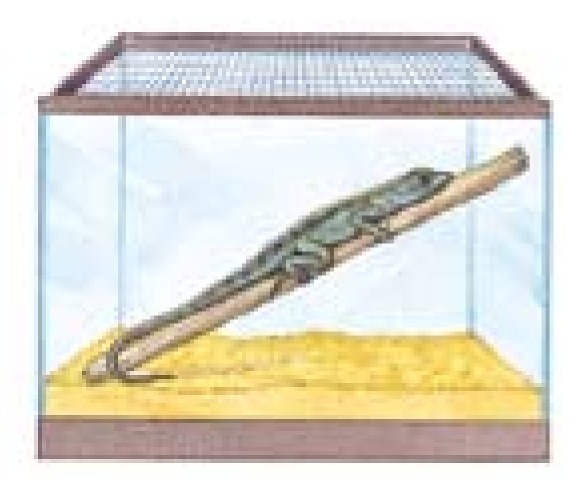
La vegetación de las islas varía; en unas medran árboles de ancho tronco, en otras sólo arbustos ralos. Contábamos, pues, con la naturaleza ideal para comprobar, en 1991, si los lagartos introducidos por los Schoener se habían adaptado a las diferentes circunstancias en que se encontraban. Sobre la base de nuestros estudios de los anolis de las Antillas Mayores, podíamos avanzar algunas hipótesis de trabajo: las poblaciones de lagartos de islas con superficies anchas deberían tener patas más largas que las que vivían en islas con sólo posaderos estrechos. Nuestros hallazgos corroboraron las predicciones, lo que indicaba que las poblaciones se habían adaptado con presteza a diferencias ambientales de la manera exacta que esperábamos. Los lagartos con sustratos más anchos poseían patas varios milímetros más largas que los que habían crecido sobre superficies más estrechas.

Estos resultados admitían una explicación alternativa. Lisa y llanamente, las patas de lagartos que crecen sobre superficies más amplias podrían sencillamente alargarse más que las patas de lagartos que viven sobre superficies más estrechas. Se trataría de un caso de plasticidad fenotípica, que podría incluso darse en individuos genéticamente idénticos. Según estudios sobre el crecimiento de los huesos realizados en mamíferos y aves, los huesos de individuos diferentes que experimentan tensiones y esfuerzos distintos durante la fase de crecimiento se desarrollan también de forma distinta. Por ejemplo, en los jugadores profesionales de tenis el brazo que sirve la pelota es más largo que el otro. Dado que los jugadores profesionales pasan horas golpeando fuertemente pelotas de tenis, un día tras otro, a lo largo de su infancia, los resultados observados indican con claridad de qué modo las diferencias en las pautas de actividad desembocan en una diversa longitud del brazo.

De los tenistas profesionales a los lagartos que crecen en islas con diferentes tipos de vegetación media, sin embargo, un largo trecho. Para comprobar si el ejercicio alteraba la longitud de las extremidades de los lagartos, varios colegas y yo criamos juveniles de *Anolis sagrei* en dos entornos del zoológico de Saint Louis: sobre estaquillas de madera de 0,7 centímetros de ancho y sobre tablas de madera de 8 centímetros de ancho. Observamos, para nuestra sorpresa, que los lagartos instalados sobre la superficie ancha desarrollaban patas más largas que las que lo hacían sobre las superficies estrechas, aunque las diferencias no eran tan notables como las encontradas entre los usua-



3. ARBOLES EVOLUTIVOS que ilustran dos de las muchas hipótesis posibles sobre el parentesco genético de los lagartos anolis. En un extremo, cada tipo de especialista evolucionó, una y otra vez, en las diferentes islas (*izquierda*). En el otro extremo, cada especialista evolucionó de una vez por todas, para acabar después ocupando las distintas islas (*derecha*). El análisis del ADN sugiere que la más probable es una situación similar al primer supuesto.




4. PLASTICIDAD FENOTIPICA puesta de manifiesto cuando se cría a *Anolis sagrei* desde la eclosión hasta la edad adulta en diferentes sustratos. Los lagartos que crecen sobre estaquillas desarrollan patas posteriores ligeramente más cortas (varios milímetros) que los que crecen sobre tablas anchas. (Los dibujos no están hechos a escala.)

rios de ramitas y de bases de árboles en las Antillas Mayores.

Sugieren tales hallazgos que las diferencias percibidas entre las poblaciones introducidas en las islas de las Bahamas podrían deberse a la plasticidad fenotípica. Para verificar tal afirmación, necesitaremos criar lagartos procedentes de poblaciones con distinta longitud de las extremidades en condiciones semejantes y controladas. Si las diferencias observadas en la naturaleza son el resultado de un proceso de plasticidad fenotípica, entonces los individuos criados en cautividad, bajo condiciones idénticas, no debieran presentar diferencias en la longitud de las patas.

De unos años acá, se viene acariciando la idea de que la plasticidad fenotípica desempeñe un papel importante en la evolución adaptativa. Al desarrollar morfologías adaptadas a diferentes ambientes, la plasticidad fenotípica puede permitir que una población explote un hábitat donde, sin tal capacidad, no sobreviviría. Esas divergencias morfológicas no tienen una base genética ni reflejan cambio evolutivo. Pero, andando el tiempo, podrán experimentar mutaciones aleatorias en beneficio de una mejor adaptación ulterior de las poblaciones al nuevo hábitat. Tales cambios, asentados ahora sobre una base genética, conducirán a un cambio evolutivo. Con tiempo suficiente, la mutación y la selección natural pueden producir especies distintas de la forma ancestral y mejor adaptadas que ésta. La plasticidad fenotípica se convertiría así en proceso importante para el inicio de cambios evolutivos sustanciales. Esta hipótesis, aunque propuesta hace más de 50 años, comienza a recibir la debida atención y merece ser investigada a fondo.

Peculiaridades de las islas

La última pieza del rompecabezas que nos faltaba por descubrir era la propia razón de la formación evolutiva de las especializaciones. A tenor de cierta explicación, habría dos especies ancestrales, no especializadas, que se hicieron simpátricas, quizá porque una colonizó una isla ocupada por la otra. Puesto que la mayoría de las especies de anolis tienen una dieta bastante amplia —comen insectos múltiples, así como, en algunos casos, frutos y pequeños vertebrados—, es probable que dos de tales especies hubieran competido por el alimento. Al utilizar hábitats distintos y nutrirse de presas diferentes, habrían reducido a una mínima expresión las interacciones competitivas. La selección natural habría favorecido la evolución de rasgos que permitieran que cada especie se adaptara a su hábitat, produciendo así las especies especializadas que vemos.

Aunque no es posible determinar si la competencia entre los anolis ancestrales llevó a la especialización, cabe averiguar si existe en la actualidad competencia entre las especies. Que tal ocurre parecen abonarlo numerosos trabajos. Los estudios comparativos de poblaciones de *A. sagrei* en las Bahamas revelan que en áreas donde la especie se encuentra sola, se posa en puntos más altos y utiliza una gama más amplia de posaderos que en los lugares donde viven otras especies de anolis. La competencia con otras especies más arbóreas parece obligar al anolis pardo a alterar su utilización del hábitat. Pero caben otras explicaciones de tal comportamiento. Quizás el hábitat donde hay otras especies sea distinto del empleado por una especie sola.

Los experimentos de campo pueden ayudar a zanjar esta cuestión. En la pluviselva de Puerto Rico, capturé con Manuel Leal y Javier A. Rodríguez-Robles a todos los individuos de *Anolis gundlachi* (el lagarto zanquilargo que vive en la base de los árboles) de tres parcelas de 20 por 20 metros, y los sacamos de allí. En ellas hicimos luego el seguimiento de la densidad de población de una segunda especie, *A. evermanni*, el anolis de Evermann de la bóveda arbórea. Nos sirvieron de controles tres parcelas similares de las que no se extrajo *A. gundlachi*. Pasadas ocho semanas, la densidad de población de *A. evermanni* era significativamente mayor en las parcelas sin *A. gundlachi* que en las parcelas control.

A resultados similares llegué con el trabajo que David Spiller y yo realizamos en algunas islas minúsculas de las Bahamas. Introdujimos poblaciones del anolis verde, *A. carolinensis*, que vive en la bóveda arbórea, en lugares no habitados. Comparamos luego su desenvolvimiento cuando vivían solas y cuando medraban en islas donde coexistían con *A. sagrei*. Encontramos que *A. carolinensis* se desempeñaba mucho mejor cuando no tenía que competir con *A. sagrei*. Tales y otros hallazgos prestan sólido respaldo a la tesis de la incidencia negativa de la simpatría en los anolis. Aunque son posibles otros procesos (como la depredación de una especie de anolis sobre otra), la competencia por los recursos es, con mucho, la explicación más probable. Los experimentos realizados por Joan Roughgarden y su grupo, de la Universidad de Stanford, indican que cuanto mayor es la

similaridad ecológica y morfológica entre especies, mayor es la presión mutua ejercida. Así, resulta muy plausible que la competencia fuera el proceso que condujera a la especialización de hábitat.

Nos queda todavía la pregunta clave: ¿Por qué razón la diversificación evolutiva condujo a resultados tan parecidos? Pudiera deberse a la pobreza biológica de las islas, con un número bastante inferior de especies de lagartos, aves y otros animales que las regiones vecinas del continente. Gracias a tal parvedad, los anolis han podido radiar a ecosistemas relativamente abiertos, sin los inconvenientes de una depredación o competencia excesivas. Puesto que hay pocos animales que influyan sobre el curso de la evolución y habida cuenta de que los ambientes de las islas se parecen, la evolución podría tomar el mismo rumbo. Eso es lo que se ha visto también en la repetida radiación de los peces cíclidos de los lagos de Africa Oriental.

Sin embargo, por lo que sabemos, la radiación adaptativa iterada constituye la excepción, no la regla. Sólo manteniendo una mente abierta y aferrándonos a los datos, doquiera nos lleven, resolveremos este misterio de la historia natural.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ADAPTIVE DIFFERENTIATION FOLLOWING EXPERIMENTAL ISLAND COLONIZATION IN *ANOLIS* LIZARDS. Jonathan B. Losos, Kenneth I. Warheit y Thomas W. Schoener en *Nature*, vol. 387, págs. 70-73; 1 de mayo de 1997.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ECOLOGICAL SIGNIFICANCE OF MAXIMAL LOCOMOTOR PERFORMANCE IN CARIBBEAN *ANOLIS* LIZARDS. Duncan J. Irschick y Jonathan B. Losos en *Evolution*, vol. 52, n.º 1, págs. 219-226; febrero de 1998.

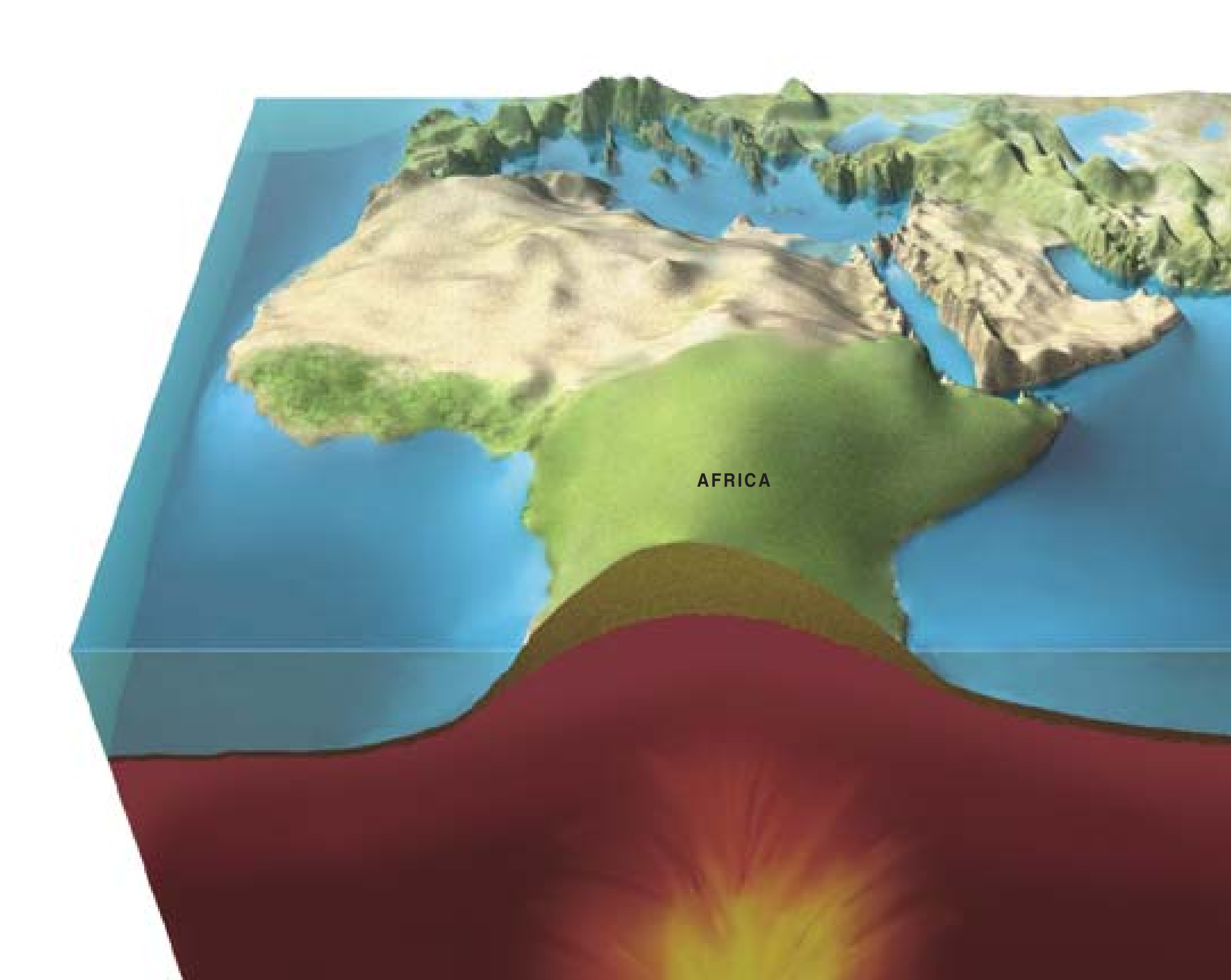
CONTINGENCY AND DETERMINISM IN REPLICATED ADAPTIVE RADIATIONS OF ISLAND LIZARDS. Jonathan B. Losos, Todd R. Jackman, Allan Larson, Kevin de Queiroz y Lourdes Rodríguez Schettino en *Science*, vol. 279, págs. 2115-2118; 27 de marzo de 1998.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF INTERSPECIFIC INTERACTIONS BETWEEN TWO PUERTO RICAN *ANOLIS* LIZARDS. Manuel Leal, Javier A. Rodríguez-Robles y Jonathan B. Losos en *Oecologia*, vol. 117, n.º 1/2, págs. 273-278; 17 de noviembre de 1998.

La superficie de la Tierra, expresión de su dinámica interna

Los procesos que operan en las profundidades del interior de la Tierra levantan y hunden continentes enteros. No se limitan, pues, a inducir el movimiento horizontal de las placas de la corteza

Michael Gurnis



Tradicionalmente se ha atribuido el mérito del modelado de la superficie terrestre a las violentas colisiones entre las placas tectónicas, esos fragmentos móviles que constituyen la litosfera. Nos lo confirman la cordillera del Himalaya, que emergió cuando Asia incorporó la placa india, y los Andes, que se elevan a medida que el fondo del océano Pacífico subduce bajo América del Sur. Sin embargo, aunque el movimiento de las placas encierra una fuerza poderosa, no aporta una explicación suficiente de ciertos rasgos importantes del relieve del planeta.

En el sur de Africa emerge una de las más vastas altiplanicies del mundo, de más de 1600 kilómetros de extensión y casi 1600 metros de altitud. Las improntas geológicas evidencian que el sur de Africa y el fondo oceánico colindante han ascendido lentamente durante los últimos 100 millones de años, a pesar de que no ha experimentado ninguna colisión tectónica desde hace unos 400 millones de años.

El abombamiento africano, así se denomina esa masa emergida, constituye sólo un ejemplo de drástico movimiento vertical sufrido por una extensa región de la superficie terrestre. En otros casos, acaecidos en un pasado muy lejano, inmensos territorios de Australia y América del Norte se hundieron más de mil metros para, luego, volver a ascender.

En geofísica, ciencia que estudia el interior de la Tierra, se viene sospechando, desde hace tiempo, que, detrás de tales cambios verticales, se encontraría la actividad del manto. Esta zona, constituida por rocas fundidas, se halla justo debajo del rompecabezas resultante de la configuración de la corteza en placas tectónicas y se extiende a unos 2900 kilómetros de profundidad, hasta el límite exterior del núcleo de la Tierra. Sabemos ya que las variaciones en la intensidad del calor y presión del manto permiten que las rocas sólidas se desplacen lentamente, como si de fluidos se tratara, durante miles de años. Mas, en un comienzo, la ciencia no acertó a descifrar por qué originaba movimientos verticales de tal magnitud. Hasta que llegaron los potentes modelos por ordenador. Ahora es posible combinar situaciones actuales del manto con indicios de su comportamiento en el pasado y empezar a establecer las causas que provocan los impresionantes ascensos y descensos de algunas partes de la superficie terrestre.

El misterio del abovedamiento africano se encontraba entre los más fáciles de desvelar. Desde la primera mitad del siglo XX la geofísica admite que, a lo largo de la historia geológica, el manto sube, se agita y se revuelve como una espesa sopa a punto de entrar en ebullición. La baja densidad relativa de las rocas más calientes las hace muy ligeras, por lo que ascienden con lentitud. No así las rocas más frías y densas, que se hunden hasta que el calor procedente del núcleo fundido las calienta lo suficiente como para que vuelvan a elevarse. Estos movimientos del manto tridimensio-



1. LA SUPERFICIE TERRESTRE ha sufrido en el curso de su historia ascensos y subsidencias de franjas continentales. Así, por ejemplo, Africa austral se ha elevado unos 300 metros en los últimos 20 millones de años. En cambio, las cimas más altas de un continente que se hunde configuran las islas de Indonesia. La ciencia ha descubierto las causas de ese misterioso movimiento vertical en las profundidades del interior de la Tierra.

nales o de convección se consideraban capaces de desplazar horizontalmente las placas tectónicas, aunque parecía inverosímil que las fuerzas que desatan pudieran levantar y hundir amplios sectores de la litosfera. Pero el escepticismo respecto al poder del manto empezó a desvanecerse con la obtención de las primeras imágenes del interior de la Tierra, todavía muy imprecisas.

Desde hace unos 20 años se captan instantáneas tridimensionales del manto a partir del registro de las vibraciones que provocan los terremotos originados en la corteza. La velocidad de tales vibraciones u ondas sísmicas viene determinada por la composición química de las rocas que atraviesan, así como por la temperatura y la presión a las que éstas se hallan. Las ondas, lentas en las rocas calientes y menos densas, se aceleran en las regiones frías y densas. Conociendo el tiempo que tardan las ondas sísmicas en viajar desde el epicentro del terremoto hasta una estación de medida en la superficie, se pueden inferir las temperaturas y densidades de un segmento dado del manto. La obtención de un mapa de velocidades sísmicas a partir de los datos de miles de terremotos, acontecidos a lo largo de todo el globo, permite cartografiar las temperaturas y densidades existentes en el manto.

Estas instantáneas sísmicas, cada vez más detalladas con la mayor precisión de los datos recabados, han desvelado algunas formaciones inmensas e inesperadas en las zonas más profundas del manto. La mayor de las estructuras resulta estar justo bajo el extremo austral de Africa. Hace un par de años, los sismólogos Jeroen Ritsema y Hendrik-Jan van Heijst, del Instituto de Tecnología de California, calcularon que esa masa ingente, con forma de seta, se extiende unos 1500 kilómetros hacia arriba desde el núcleo y alcanza varios miles de kilómetros de anchura (*véase la figura 3*).

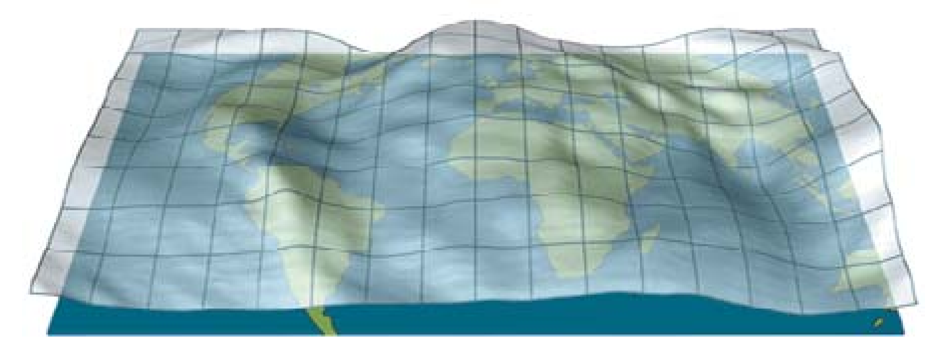
¿Podía semejante mancha estar levantando Africa? Puesto que se trata de una región que las ondas sísmicas atraviesan con suma lentitud, dieron por sentado que se hallaba más caliente que el manto circundante. De acuerdo con los principios físicos del movimiento de convección, ese penacho ardiente estaría probablemente ascendiendo. Pero una instantánea sísmica sólo registra un momento en el tiempo y, por lo tanto, la posición estática de una estructura. Sin embargo, aunque la mancha tuviera una constitución diferente de la roca circundante, podría estar más caliente y, aun así, no ascender. Ante ese dilema, otro geofísico, Jerry X. Mitrovica, de la Universidad de Toronto, y yo mismo decidimos generar una imagen que reflejara lo sucedido a lo largo del tiempo. Introdujimos la forma de la mancha y su densidad estimada, junto con los cálculos del momento en el que Africa inició su levantamiento, en un programa informático de simulación de la convección del manto. El resultado, obtenido el año pasado, es que se trata de una masa, aunque ingente, suficientemente ligera para seguir ascendiendo poco a poco por el manto y, mientras lo hace, capaz de continuar empujando Africa hacia arriba.

Los registros sísmicos y los modelos por ordenador son herramientas básicas de los geofísicos y bastaron para resolver el enigma del abombamiento africano. Más difícil resultó comprender los movimientos de ascenso y descenso de América del Norte y Australia, ya que la explicación no reside sólo en el manto tal y como lo entendemos en la actualidad. Debemos recurrir a la geología tradicional y su explicación histórica de la variación de la superficie terrestre en el transcurso del tiempo.

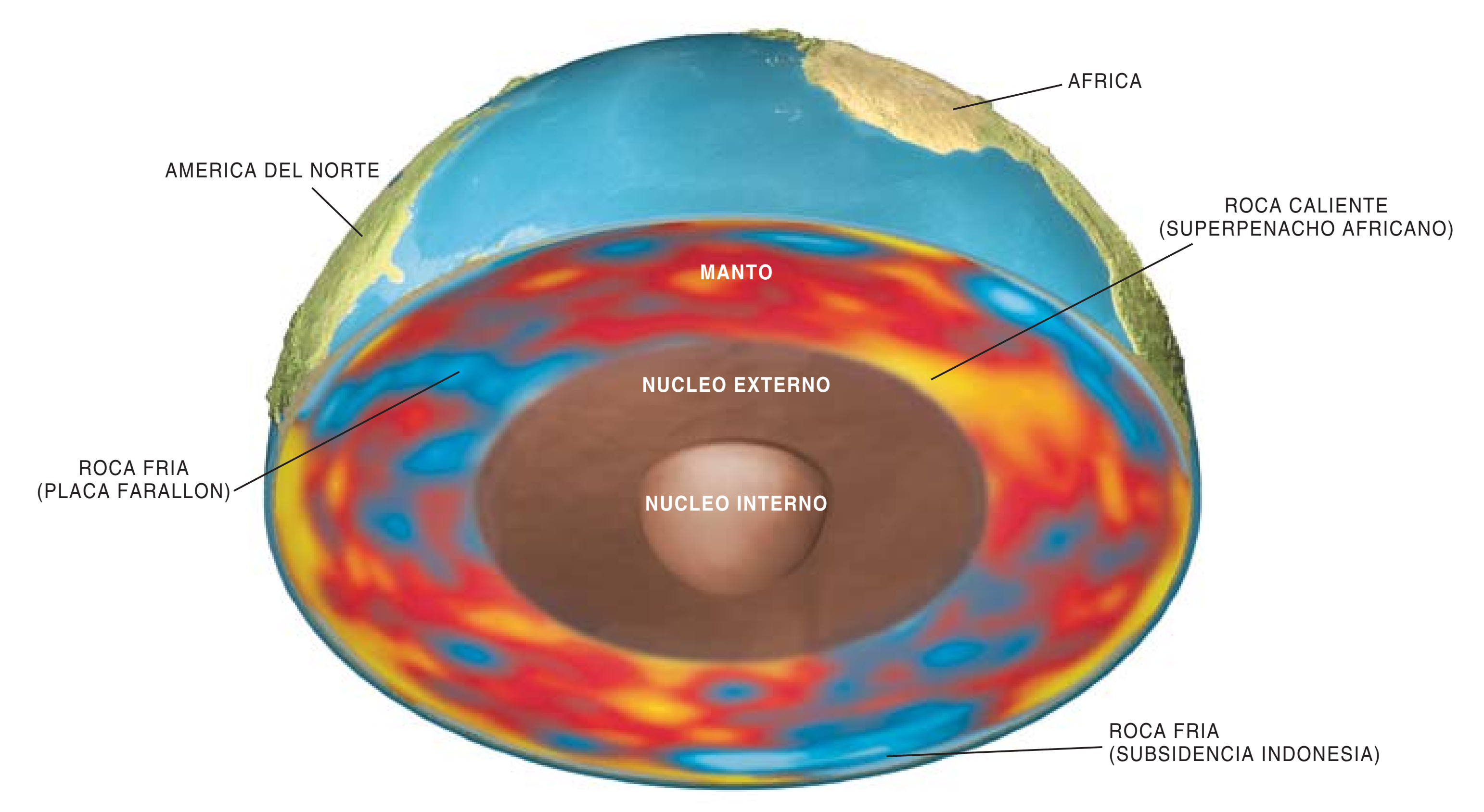
Fantasmas del pasado

Las perspectivas que habrían de ayudarnos a dar cuenta de los abovedamientos de Australia y América del Norte se habían insinuado en investigaciones sobre una cuestión sin relación manifiesta: la influencia de la densidad del manto en el campo gravitatorio de la Tierra. En los años sesenta se suponía, con el respaldo de principios básicos de física, que la gravedad sería menor sobre regiones de rocas a mayor temperatura, de menor densidad y masa. Pero las primeras cartografías de las variaciones gravitatorias de la Tierra no mostraban la correlación esperada entre la gravedad observada y las partes más o menos frías del manto.

Muy al contrario, a finales de los setenta y principios de los ochenta, Clement G. Chase descubrió la pauta opuesta. Cuando Chase, hoy en la Universidad de Arizona, empezó a considerar extensiones superiores a 1600 kilómetros, halló que la gravedad sobre regiones volcánicas aisladas o puntos calientes era mayor que sobre las regiones del manto más frías. Y, lo que quizá revestía sorpresa mayor, descubrió un gran segmento de baja gravedad que se extiende desde la bahía de Hudson, en Canadá, hacia el polo Norte, atraviesa Siberia, la India y baja de latitud hasta alcanzar la Antártida. Relacionándolo con las estimaciones existentes sobre la antigua configuración de las placas tectónicas, llegó a la conclusión de que esa franja de baja gravedad señalaba la posición que tenían hace 125 millones de años distintas zonas de subducción, es decir, zonas donde las placas tectónicas que arrastran litosfera oceánica se sumergen en el manto. Parecía como si los vestigios de las antiguas zonas de subducción provocasen la disminución de la gravedad, cuando cabría esperar que los fragmentos de litosfera oceánica, al ser fríos, densos y aún hundiéndose, motivaran su aumento.



2. LAS PROMINENCIAS y depresiones de la superficie transparente sobre el mapamundi representan las variaciones del campo gravitatorio del planeta. Los puntos más elevados indican una gravedad superior a la normal, causada por bolsas internas de la Tierra con exceso de masa. Las zonas deprimidas coinciden con regiones donde el déficit de masa produce una franja de baja gravedad. Tales diferencias de gravedad insinúan la situación de irregularidades en la estructura del manto terrestre.



3. EL MAPA DEL MANTO integra los registros de millares de ondas sísmicas que han viajado por todo el planeta. Las regiones donde las ondas avanzan a gran velocidad (*azules*) indican, por norma, rocas frías y densas. Las regiones donde las ondas progresan con lentitud (*amarillas*) denotan materiales más calientes y menos compactos. Bajo Africa austral y el Atlántico sur hay una bolsa de lenta velocidad, una mancha flotante de roca caliente denominada superpenacho africano. El mapa muestra también material frío en descenso que tira de América del Norte e Indonesia.

A mediados de los años ochenta, el geofísico Bradford H. Hager, ahora en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, resolvió la paradoja. Propuso que, además de la temperatura, habría otros factores que podrían crear bolsas con exceso de masa o con déficit de masa en el manto. Hager desarrolló su teoría a partir de la física de fluidos, que gobierna el comportamiento a largo plazo del manto. Así pues, cuando un fluido de baja densidad asciende, del modo como lo hacen las partes más calientes del manto, la fuerza del flujo levanta a su vez el fluido más denso suprayacente. Este suave ascenso produce un exceso de masa y, por lo tanto, una mayor gravedad cerca de la corteza. Por la misma causa, puede disminuir la gravedad ejercida sobre materiales más fríos y densos. Cuando estos pesados materiales se hunden, arrastran consigo masa que alguna vez estuvo muy cerca de la superficie. Esta concepción explicaría la capacidad de los vestigios de las zonas de subducción para generar una banda de baja gravedad: parte de la litosfera oceánica fría y hundida estaría aún sumergiéndose en el manto y, en el proceso, llevándose con ella la superficie terrestre. Si Hager andaba en lo cierto, el manto no sólo se deslizaría horizontalmente bajo la corteza, sino que el conjunto de sus movimientos verticales también afectaría a la superficie. Las zonas en ascenso levantarían las masas continentales y las zonas en descenso las arrastrarían hacia el interior.

El ascenso y descenso de los continentes

Al mismo tiempo que Chase y Hager descubrían el mecanismo que posibilitaba el imponente ascenso y hundimiento de la superficie terrestre, comenzaron a aparecer pruebas de que, en el pasado, la superficie terrestre había sufrido abombamientos y descensos importantes. Por doquier las formaciones geológicas contienen huellas de las fluctuaciones del nivel del mar en el transcurso del tiempo. Se sospechaba que las fluctuaciones afectaban por igual a todas las masas continentales, hasta que surgieron los primeros indicios que sugerían que las fluctuaciones más importantes del nivel del mar se debían a los movimientos verticales de los continentes. Así, conforme una masa emergida ascendiera respecto a las demás, el nivel del mar circundante aparentemente bajaría, mientras que se mantendría el nivel del océano que rodeara al resto de los continentes.

Sin embargo, la mayoría de los geólogos cuestionó la idea de un movimiento vertical de los continentes, incluso cuando a principios de los años setenta aparecieron las primeras señales del extraño ascenso y descenso de Australia. John J. Veevers, de la Universidad Macquirie de Sydney, examinó algunos afloramientos de rocas antiguas de la Australia oriental y descubrió que, en los albores del período Cretácico (hace unos 130 millones de años), un mar somero cubrió repentinamente la mitad de Australia, mientras que el resto de los continentes se inundaban con parsimonia mucho mayor. El máximo nivel del mar se alcanzó en todo el planeta a finales del Cretácico (unos 70 millones de años atrás), al tiempo que se retiraba de las costas de Australia. La mitad oriental del continente australiano debió de hundirse más de mil metros respecto al resto de las masas continentales y emergió de nuevo antes que el nivel global del mar empezara a descender.

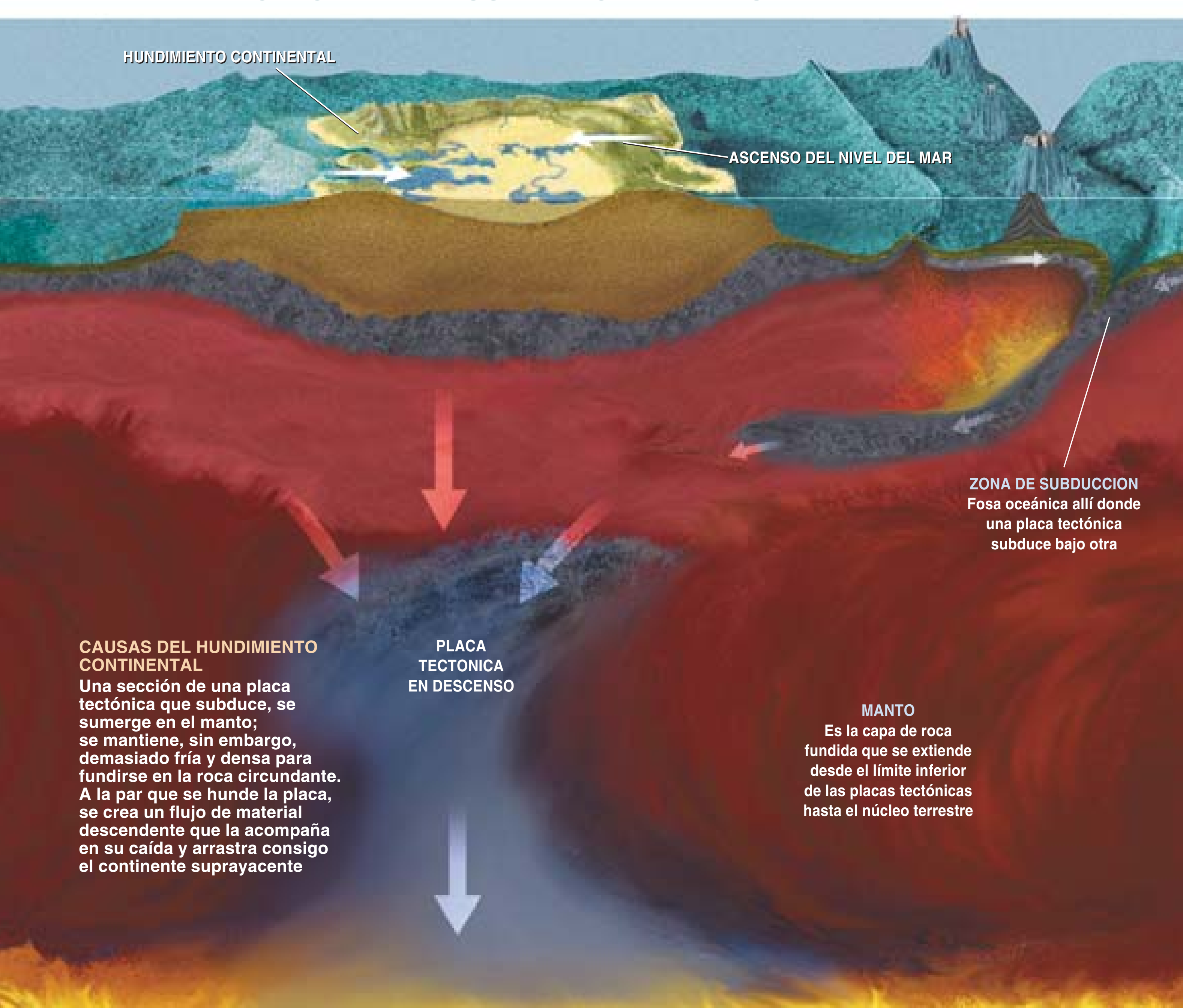
La propuesta de Veevers de un continente que rebota resultó ser sólo una parte de la misteriosa historia de Australia. En 1978, Gerard C. Bond, actualmente en el

Observatorio Geológico Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, descubrió una sucesión de acontecimientos todavía más extraños cuando buscaba ejemplos de movimientos continentales verticales en la historia global del planeta. Después de los repentinos hundimiento y ascenso de Australia en el Cretácico, el continente descendió de nuevo, unos 180 metros, desde entonces hasta nuestros días. Ninguna interpretación razonable basada exclusivamente en la tectónica de placas podía dar razón de la magnitud de los movimientos verticales descubiertos por Veevers y Bond. Para encontrar una explicación satisfactoria, había que enlazar tal información con otra pista importante, la teoría de Hager sobre la capacidad del manto de modificar la forma de la superficie terrestre.

El primer gran paso para integrar ambas interpretaciones se dio merced a la observación de otro ejemplo de ascenso y descenso continental procedente del estudio global de Bond. A finales de los ochenta, este trabajo inspiró a Christopher Beaumont, de la Universidad Dalhousie de Nueva Escocia, para abordar un fenómeno incomprensible asociado a la ciudad de Denver (Colorado). Aunque su altitud es superior a 1600 metros sobre el nivel del mar, se asienta sobre una planicie constituida por rocas marinas no deformadas originadas durante el período Cretácico. En aquel entonces y a pesar que el nivel del mar era tan sólo unos 120 metros superior al actual, vastos mares cubrían la mayoría de las masas continentales. De eso se infiere que el océano nunca pudo penetrar hasta la situación actual de Denver, por mucho que fuera la primera región en ser arrastrada y hundida más de mil metros, permitiendo la inundación del interior continental.

A partir de la situación de la línea de costa de América del Norte durante el Cretácico, Beaumont estimó que este hundimiento y el subsecuente ascenso hasta la posición actual afectó a una zona de más de 1000 kilómetros de extensión. Semejantes proporciones no se adecuaban a la interpretación dominante, que otorgaba a la tectónica de placas toda la capacidad de esculpir

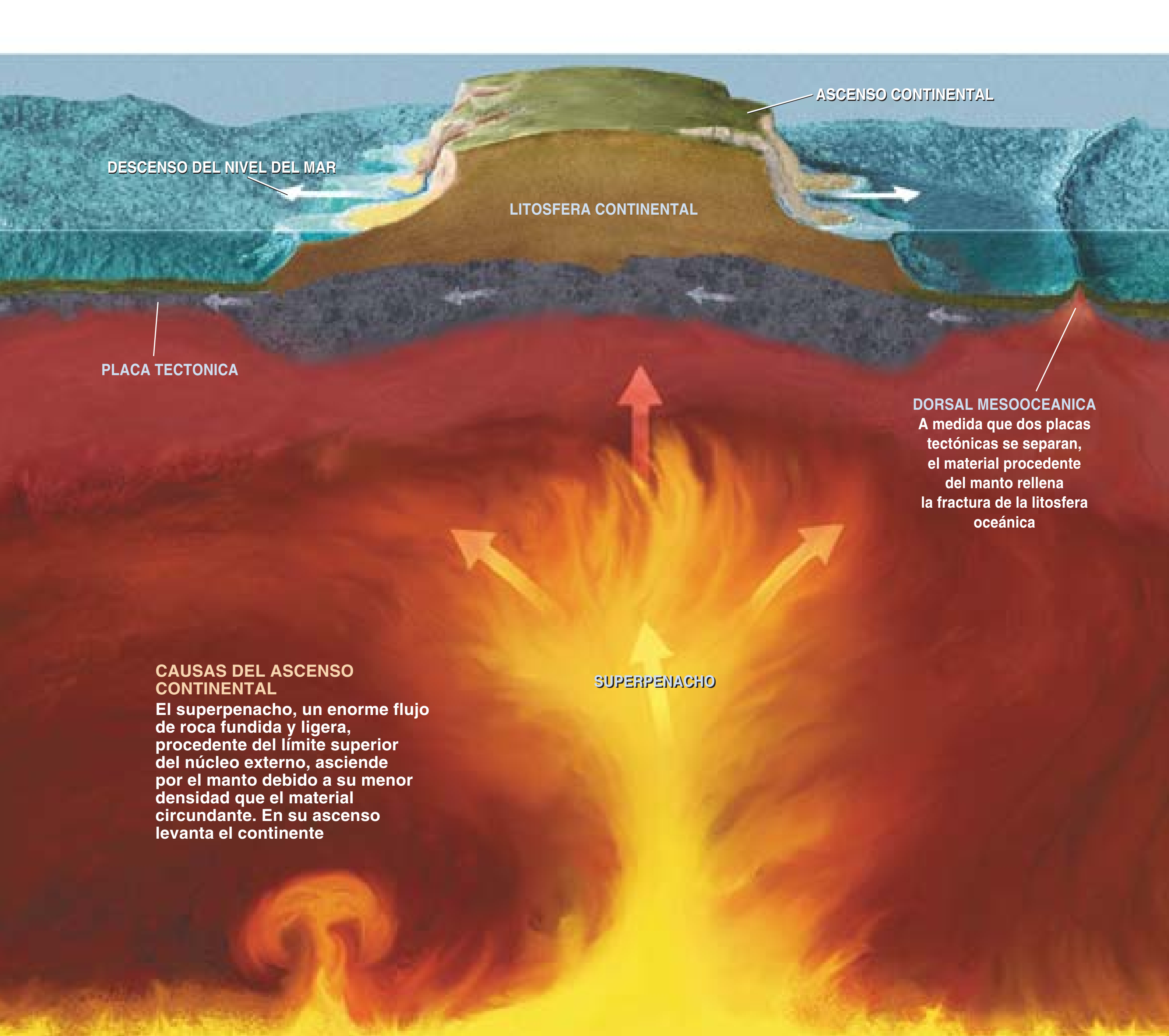
EL MANTO MODELA LA SUPERFICIE TERRESTRE



la superficie. El mecanismo de la tectónica de placas permite movimientos verticales únicamente hasta unos 160 kilómetros desde los bordes de las placas, donde éstas son tan delgadas que, cuando las fuerzas tectónicas actúan sobre ellas, se doblan como una caña de pescar. Pero el movimiento del interior continental de América del Norte ocurrió a centenares de kilómetros tierra adentro, muy lejos de la influencia de las colisiones tectónicas. Tuvo, pues, que provocarlo un proceso totalmente diferente.

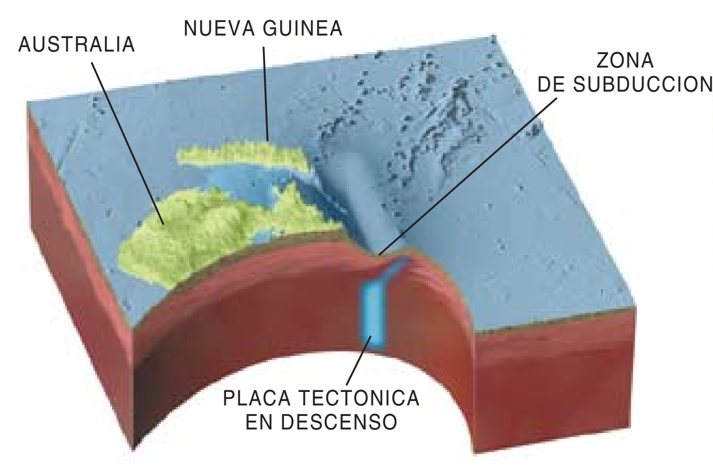
Beaumont sabía que había fragmentos de antigua litosfera oceánica en el manto, bajo América del Norte, bloques que en teoría podrían haber arrastrado consigo parte del continente. Para determinar si un flujo descendente pudo causar el hundimiento de Denver, Beaumont formó un equipo de investigación con Jerry Mitrovica, que acababa de licenciarse por la Universidad de Toronto, y con Gary T. Jarvis, de la Universidad York de Toronto. Hallaron que la subsidencia de América del Norte a lo largo del Cretácico pudo ser causada por la placa Farallón, conforme ésta se hundía en el manto bajo la costa occidental del continente. Basados en un modelo informático, razonaron que la antigua placa penetró, casi horizontalmente en el manto. A medida que se sumergía, creaba un flujo descendente tras de sí que remolcó América del Norte hasta tan abajo, que permitió que el océano la inundara. Cuanto más se hundía la placa Farallón, su estela perdía fuerza y la tendencia a flotar del continente la superó; entonces, América del Norte emergió de nuevo.

En 1989, cuando los investigadores canadienses adelantaron su teoría, hacía ya mucho tiempo que la placa Farallón se había desvanecido en el manto. Lo que significa que su existencia se había deducido a partir de indicios geológicos del fondo del océano Pacífico. Mas, por aquel entonces, las imágenes sísmicas carecían de resolución suficiente para delimitar una estructura de la nimiedad de una sección de litosfera oceánica desplazándose por el manto. Hasta que, en 1996, la situación cambió con las nuevas imágenes del manto. Los sismólogos Stephen P. Grand, de la Universidad de Texas en Austin, y Robert D. Van der Hilst, del MIT, ads-

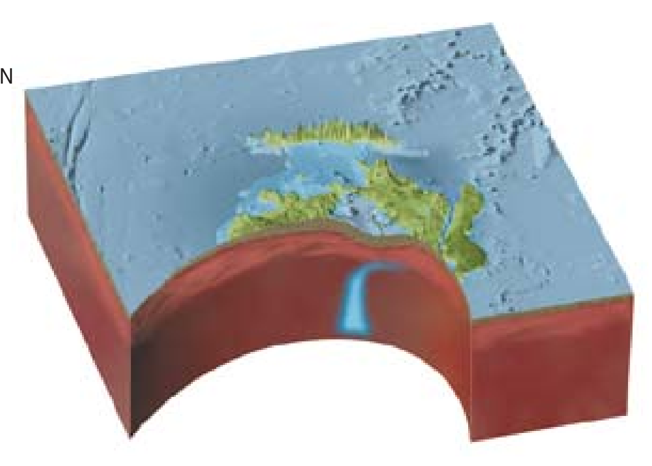


EL ASCENSO Y DESCENSO AUSTRALIANO

El modelo informático revela el modo en que los vestigios de una antigua zona de subducción hundieron el continente



Hace 130 millones de años
Australia se encuentra rodeada de una zona de subducción, una profunda fosa donde la placa tectónica del este se sumerge en el manto. La placa en descenso (*azul*) arrastra el manto circundante; el extremo oriental de Australia se hunde con ella. Más tarde, cesa la subducción y el continente prosigue su avance hacia el este.



Hace 90 millones de años
La mitad oriental de Australia se hunde unos 300 metros bajo el nivel del mar, a medida que el continente se desplaza en sentido este y por encima de la placa tectónica en descenso. Unos 20 millones de años después, la placa pierde capacidad de arrastre al descender hasta lo más profundo del manto. En consecuencia, el continente rebota y asciende de nuevo.

critos a grupos de investigación distintos, presentaron dos imágenes basadas en registros sísmicos absolutamente diferentes. Ambas imágenes mostraban estructuras prácticamente iguales, en particular los descensos de manto más frío asociados a placas de litosfera oceánica. La antaño desaparecida placa Farallón aparecía con nitidez en las imágenes y adoptaba una forma de plancha arqueada a más de 1600 kilómetros de profundidad, bajo la costa oriental de los Estados Unidos.

Gondwana

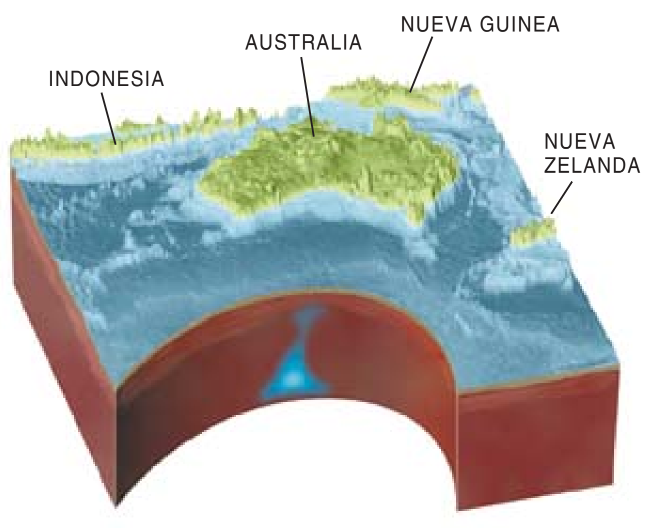
El maridaje del movimiento de ascenso y descenso de América del Norte con la subducción de la litosfera oceánica dibujaba un vínculo convincente entre las antiguas fluctuaciones del nivel del mar y los avatares del manto. Resultaba también evidente que la vieja placa Farallón se sitúa en la franja de baja gravedad que había observado Chase dos decenios antes.

¿Por qué no aplicar esas ideas al más misterioso de los movimientos de ascenso y descenso continentales, el de Australia durante el Cretácico? Durante 15 años había venido realizando simulaciones por ordenador de la convección del manto; mis resultados demostraban que esa zona podía levantar la superficie más de mil metros, suficientes para provocar un descenso aparente del nivel del mar. Igual que Chase, Veevers y otros que me precedieron, recurrí a la historia de la tectónica de placas en busca de pistas de algún fenómeno del manto que pudiera reputarse responsable del rebote de Australia. Durante el período Cretácico, Australia, América del Sur, Africa, India, la Antártida y Nueva Zelanda formaban un vasto supercontinente, el Gondwana, que perduró más de 400 millones de años antes de dividirse en los actuales continentes. A lo largo de la mayor parte de su historia, Gondwana estuvo bordeado por una extensísima zona de subducción, por donde placas oceánicas frías se introducían en el manto.

Sospeché que la zona de subducción que rodeó Gondwana durante cientos de millones de años había causado el ascenso y el descenso australiano. De la sospecha pasé al convencimiento cuando delineé las viejas zonas de subducción sobre los mapas de antiguas configuraciones de placas tectónicas que había levantado R. Dietmar Müller, geofísico marino de la Universidad de Sydney. Las líneas de subducción parecían explicar las peculiaridades de Australia, que habría pasado por encima mismo de la antigua zona de subducción en el momento en que esta última se hundía en el manto.

Para conocer el comportamiento de una laja fría en el manto durante los millones de años que duró la fragmentación de Gondwana, Müller, el autor y Louis Moresi, de la Organización Commonwealth de Investigación Científica e Industrial en Perth, formamos un equipo. Nos proponíamos aplicar una simulación informática que describiera, a lo largo del tiempo, la influencia del manto en la configuración de Australia. Partimos de tres datos conocidos: la posición original de la antigua zona de subducción, la historia de los movimientos regionales horizontales de las placas y, en tercer lugar, las propiedades estimadas (la viscosidad, por ejemplo) del manto subyacente. Con estas premisas, el programa trazó un

MICHAEL GURNIS investiga la dinámica interna de la Tierra y de las placas tectónicas, un interés por los procesos físicos que gobiernan la historia del planeta que se le despertó hace 20 años. Junto a su equipo del Instituto de Tecnología de California, desarrolla programas informáticos de simulación de la dinámica del manto que revelan que a lo largo del tiempo ésta ha ido determinando la forma de la superficie terrestre.



Hoy
Australia se halla al norte de su antigua posición, empujada por la actividad de las placas tectónicas adyacentes iniciada 45 millones de años atrás. Todo el continente ha perdido altura a causa del arrastre hacia el manto que tiene lugar bajo Indonesia, masa continental que también se está hundiendo.

cuadro de Australia que coincidía casi perfectamente con nuestras hipótesis.

La simulación comenzaba hace 130 millones de años, cuando la litosfera oceánica se hundía bajo Australia oriental. Al separarse de Gondwana, Australia avanzó por encima de la placa oceánica descendente y fría, que acabó arrastrando y hundiendo la placa australiana. El continente emergió de nuevo al continuar su progreso hacia el este y alejarse de la placa.

Nuestro modelo resolvía el enigma de los movimientos verticales de Australia durante el Cretácico, advertido por Veevers. Pero carecíamos todavía de respuesta para el hundimiento posterior que descubrió Bond. Con la ayuda de Carolina Lithgow-Bertelloni, ahora en la Universidad de Michigan, pudimos confirmar la observación de Bond según la cual, después del Cretácico, Australia había avanzado en sentido norte hacia Indonesia, hundiéndose unos 180 metros. El modelo del comportamiento del manto de Lithgow-Bertelloni, que incorporaba la evolución histórica de la subducción, sugería que Indonesia es, de todo el mundo, la región sometida hoy a un mayor hundimiento porque se halla en la intersección de un gigantesco sistema de subducción que opera en los océanos Indico y Pacífico. Y a medida que Indonesia se hunde, arrastra Australia consigo hacia abajo. Indonesia es en la actualidad un vasto continente sumergido del que sólo sobresalen las cimas más altas de sus montañas.

Africa

Situación que nos devuelve a Africa, por tratarse del caso diametralmente opuesto. Mientras Indonesia, arrastrada, se hunde, Africa recibe un impulso hacia arriba. Estos y otros movimientos del manto desarrollados en los últimos cien millones de años guardan una estrecha relación con Gondwana. La amplia franja de baja gravedad que descubrió Chase 30 años atrás es producto de las placas aún descendentes de la gigantesca zona de subducción que rodeaba al supercontinente austral. En medio de Gondwana se encontraba el sur de Africa, lo que significa que el manto subyacente estaba, y continúa, aislado del enfriamiento provocado por el hundimiento, activo todavía hoy, de las placas tectónicas que subdujeron entonces. Que esta región del manto no se haya enfriado desde hace cientos de millones de años explicaría por qué existe ahora un superpenacho, a altas temperaturas, que asciende desde lo más profundo del manto.

De esta gavilla de descubrimientos emerge una imagen viva y dinámica del manto. Empieza a vislumbrarse que los movimientos descritos modelan la superficie de formas varias. Influyen en los desplazamientos horizontales de las placas tectónicas y levantan y hunden continentes. Quizás, el descubrimiento de mayor interés sea el conocer que detrás del movimiento horizontal de las placas tectónicas se encuentra la dinámica del manto más profundo. La situación de antiguos bordes de placa todavía puede ejercer, millones de años después, su efecto en el modelado de la superficie terrestre.

Nuestras posibilidades de investigar la dinámica de la convección del manto y la tectónica de placas se multiplicarán con la incorporación de nuevos métodos de observación del manto y programas de simulación de su comportamiento. Cuando la dinámica de convección varía, lo hace a su vez el campo gravitatorio. El registro de las variaciones del campo gravitatorio de la Tierra forma parte de la misión espacial conjunta germano-estadounidense GRACE, que tiene previsto su lanzamiento en junio. Dos naves espaciales, una tras otra en órbita alrededor de la Tierra, cartografiarán las diferencias de gravedad cada dos semanas; quizá permitan inferir el lento flujo vertical asociado a la convección. A los registros sísmicos de mayor precisión les corresponderá un papel primordial para averiguar el aspecto actual del manto. El proyecto USArray, de cinco a diez años de duración y apoyado en 400 sismómetros portátiles, proporcionará imágenes del manto de 80 kilómetros de resolución y una profundidad de hasta 1300 kilómetros bajo los Estados Unidos.

Hay previstos para la próxima década diversos proyectos de recogida de datos y obtención de imágenes sin precedentes del manto, que, junto al empleo de superordenadores de potencia creciente, hacen presagiar un futuro optimista para el estudio de la dinámica interna de la Tierra una vez reconocido el papel del manto como causa última de los cambios geológicos de la superficie.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DYNAMICS OF CRETACEOUS VERTICAL MOTION OF AUSTRALIA AND THE AUSTRALIAN-ANTARCTIC DISCORDANCE. Michael Gurnis, R. Dietmar Müller y Louis Moresi en *Science*, vol. 279, págs. 1499-1504; 6 de marzo, 1998.

DYNAMIC EARTH: PLATES, PLUMES AND MANTLE CONVECTION. Geoffrey F. Davies. Cambridge University Press, 2000.

CONSTRAINING MANTLE DENSITY STRUCTURE USING GEOLOGICAL EVIDENCE OF SURFACE UPLIFT RATES: THE CASE OF THE AFRICAN SUPERPLUME. Michael Gurnis, Jerry X. Mitrovica, Jeroen Ritsema y Hendrik-Jan van Heijst en *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 1, documento n.º 1999GC000035; 2000.

PERFILES

Kate Wong

NAPOLEON CHAGNON: Un antropólogo controvertido

La acusación no es banal: inducción a la violencia de los yanomamö con fines investigadores.

A sus 62 años, Napoleon Chagnon, en su indumentaria informal, tiene el aire de un pacífico jubilado. Nadie diría que sobre el hombre sentado ante mí en un sofá tapizado, con las manos tras la cabeza y los pies sobre la mesa, recae semejante cargo. Y es que en *Darkness in El Dorado*, publicado el otoño pasado, Patrick Tierney sostiene que Chagnon avivó la violencia entre los yanomamö y se inventó datos para exagerar su comportamiento. Insinúa también que Chagnon y un colega desencadenaron una letal epidemia de sarampión. "Con leer un par de páginas del libro se diría que soy Josef Mengele", replica.

Segundo de 12 hermanos, creció en el pueblo de Port Austin (Michigan), en una casa sin agua corriente. Ya estudiante de física de la Universidad de Michigan, debía satisfacer ciertos requerimientos del plan de estudios, entre los que se contaba una asignatura de ciencias sociales que durara dos semestres. Lo único que pudo hacer encajar en su programa fue la antropología, de la que nunca había oído hablar. Pero al poco tiempo quedó prendado: "La segunda semana del segundo semestre, decidí que eso era lo que quería ser". Se quedó en la Universidad de Michigan para obtener su doctorado.

Una vez que decidió estudiar "gentes primitivas de verdad", dice, tenía dos zonas del globo donde escoger: Nueva Guinea o la cuenca del Amazonas. Eligió la segunda, pues era la menos trillada de las dos, e inicialmente seleccionó una tribu de los suyà, en el centro del Brasil. Pero justo antes de partir, estalló una revolución en ese país, lo que imposibilitaba el trabajo sobre el terreno. Más o menos al mismo tiempo, James Neel, un genético de la Universidad, se proponía acometer algunos trabajos en Venezuela. Ambos decidieron llevar a cabo un estudio pluridisciplinar de los yanomamö, tribu que agrupa a unos 27.000 indios repartidos en unos 300 poblados, diseminados por una superficie como el doble de España. "Eran bastante poco conocidos en aquella época, pero sí que sabía que vivían tanto en Venezuela como en Brasil —me cuenta—. De manera que si había revolución en Brasil, los estudiaría en Venezuela, y viceversa."

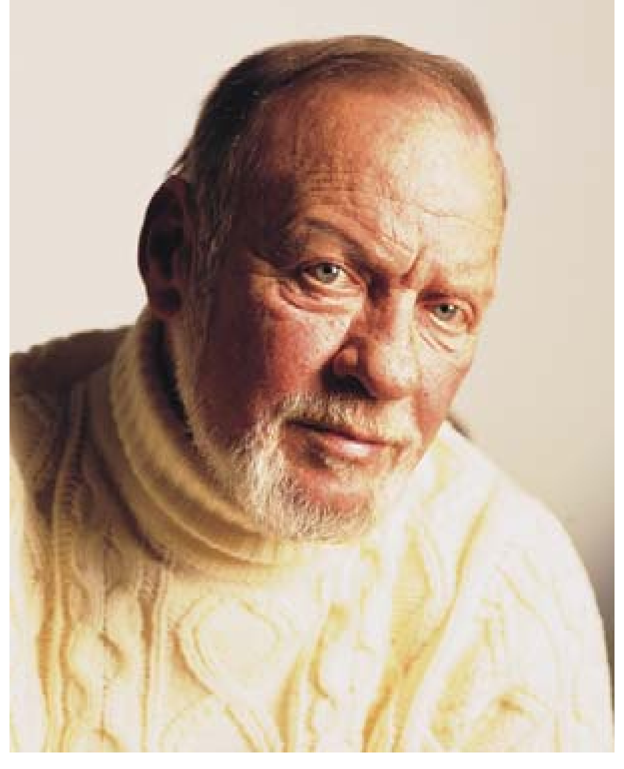
Poco después, partió con su mujer y dos niños pequeños. Su familia permaneció en Caracas durante el período de 15 meses en los que se adentró en lo más profundo de la selva tropical en busca del "hombre primitivo". Lo poco que Chagnon sabía de antemano sobre los yanomamö no le preparó para aquel encuentro inicial, que describió memorablemente en su primer libro, *Yanomamö, un pueblo fiero*:

> Miré hacia arriba y me quedé boquiabierto cuando vi una docena de hombres fornidos, desnudos, sudorosos, horripilantes, ¡mirándonos al ras del astil de las flechas con que nos apuntaban! Apretaban enormes fajos de tabaco verde entre su mandíbula inferior y los labios, lo que les hacía parecer todavía más horripilantes, y de sus narices pendían o se deslizaban mocos de color verde oscuro, en regueros tan largos que se les pegaban a los pectorales o goteaban de sus barbillas.

Más tarde supo que los hombres habían aspirado un alucinógeno, que produce abundante mucosidad nasal, y que él y el misionero que le acompañaba llegaban justo al acabar una seria reyerta entre ese poblado y un grupo vecino, una contienda que al parecer había estallado por motivo de las mujeres. Era un patrón de violencia que Chagnon observaría y relataría una vez y otra, y que acabaría enfrentándole con muchos de sus colegas.

Chagnon dice que no esperaba encontrar violencia entre los yanomamö, ni suponía que descubriría un fundamento biológico a su comportamiento. Pero al afirmar que en estos conflictos se disputaban las mujeres y no recursos materiales como el alimento, rompió con las opiniones que sostenían muchos antropólogos culturales, entre ellos los que le habían formado. Según esa opinión, influida en parte por la economía marxista, son las fuerzas materiales las que determinan el comportamiento humano.

"Incluso aunque fue un descubrimiento de antropología no deseado (era demasiado biológico), tuve que corroborar que estaban peleándose



"No me avergüenzo de lo que hice", afirma Napoleon Chagnon de sus estudios sobre los yanomamö, uno de los últimos pueblos en entrar en contacto con la civilización moderna

por las mujeres, no por la escasez de recursos materiales." La perspectiva darwiniana de Chagnon sobre la cultura guardaba cierto parecido con la expuesta en *Sociobiología* por E. O. Wilson. Chagnon (que se suele referir a sus detractores como marxistas e izquierdistas) quedó así identificado con esa escuela de pensamiento, lo que también lo hizo impopular entre los científicos sociales que creen que la sola cultura establece el comportamiento humano.

En los años que siguieron, obtuvo varias plazas en instituciones académicas y continuó volviendo al territorio yanomamö, llevando a cabo censos y recogiendo detallados datos genealógicos. En 1988, publicó un artículo en *Science* en el cual informaba que el 40 por ciento de los varones adultos de las 12 aldeas que había muestreado habían participado en la muerte de otro yanomamö; el 25 por ciento de las muertes de los varones adultos resultaban de la violencia; y aproximadamente dos tercios del conjunto de personas de 40 años o más habían perdido al menos uno de los padres, un hermano o un hijo por la violencia.

Quizá lo más sorprendente de todo fue el hallazgo de que los hombres que habían matado tenían más éxito a la hora de encontrar esposas y dejaban más descendencia que los hombres que no habían matado. "El principio general no es que la violencia sea la causa del éxito reproductor. Es que las cosas que son culturalmente admiradas y buscadas guardan frecuente correlación con el éxito reproductor —explica—. En una sociedad puede ser la opulencia, o el poder político. No es necesario ser violento para tener poder político. Pero en el mundo primitivo, donde el estado no existe, una de las destrezas más admiradas es la de ser un guerrero victorioso."

El artículo de *Science* salió al mismo tiempo que la carrera del oro alcanzaba su punto álgido en territorio yanomamö, provocando apasionadas réplicas de los antropólogos brasileños y de los defensores de los derechos humanos. Retratar a los yanomamö como asesinos, advertían, les proporcionaba a los mineros un argumento poderoso para volver la opinión pública contra los indios. Y en Venezuela, Chagnon tampoco se ganaba amigos, pues sus relaciones con los misioneros salesianos de la región se habían agriado. De hecho, en 1991, en un viaje a una aldea yanomamö que había visitado antes varias veces en buenos términos, el jefe le amenazó con su hacha, alegando que Chagnon había matado a sus niños y envenenado el agua. "El jefe indio me dijo más tarde que los salesianos habían propalado esas mentiras."

Chagnon se jubiló en 1999 de la Universidad de California en Santa Bárbara tras darse cuenta de que probablemente no podría regresar a territorio yanomamö. En sus tres últimos intentos, los funcionarios de Boa Vista y Caracas le denegaron el ineludible permiso. Así que él y su mujer, Carlene, tornaron a Michigan, mudándose a una luminosa casa de campo escondida en el bosque, a las afueras de Traverse City.

Mas esa paz se rompió cuando un libro preñado de alegatos explosivos contra Chagnon y otros investigadores de los yanomamö apareció el pasado mes de noviembre. *Darkness in El Dorado* acusa a Chagnon de incitar las contiendas, de orquestar previamente las filmaciones y de falsificar los datos sobre los yanomamö para crear el mito del "pueblo fiero". En realidad, sugiere Tierney, los yanomamö son frágiles y temerosos. La violencia que tuvo lugar, afirma, estalló a raíz de la súbita abundancia de machetes y hachas que Chagnon distribuyó a cambio de su cooperación. Le acusa además de actividades licenciosas, tales como pedir una esposa yanomamö y de darse a las drogas. Tierney también deja caer que Chagnon y el genético Neel, ya fallecido, desataron una mortífera epidemia de sarampión entre los indios, que se cobró quizá miles de vidas, por utilizar una vacuna anticuada de la que se conocían sus secuelas.

Nuestro antropólogo lo niega todo. La idea de que sus obsequios de herramientas de acero (que regaló para facilitar las tareas cotidianas) desataran las contiendas que observó es absurda, dice, señalando que los yanomamö tienen un historial de violencia que precede a su llegada. El intercambio de regalos es paso obligado si alguien quiere estudiar a los yanomamö, insiste. Incluso así, añade, sus contribuciones apenas si significan algo frente al número de machetes que se reparten en las misiones.

Le leo a Chagnon el pasaje que describe su solicitud de una mujer yanomamö. "Es un disparate total", replica, explicando que el relato tergiversa el que llamara prima a una chica, un término de parentesco que significa también "esposa" en la lengua yanomamö. Mantiene que la imputación de haber organizado de antemano sus reconocidos documentales es igualmente falsa. Y con respecto a las drogas, alega que sólo una vez las aspiró en el curso de una ceremonia, para sosegar a algunos indios que habían sido amenazados por un misionero de que serían arrojados a un abismo ardiente si continuaban adorando a sus "demonios".

En cuanto a caracterizar falsamente a los yanomamö de feroces, John Peters, de la Universidad Wilfred Laurier en Ontario que se pasó 10 años entre los yanomamö brasileños, señala que así se describen ellos mismos con orgullo. Además, según Hill, en las otras tribus sudamericanas en las que se han puesto a prueba las hipótesis de Chagnon (los waorani y los ache) parece que los "matones" y el éxito reproductor están también relacionados. Pero Hill ofrece una interpretación distinta de los mismos datos: las mujeres se sienten atraídas no hacia los matones, sino hacia los hombres grandes, fuertes y sanos, atributos que también les confieren ventaja para causar la muerte en una escaramuza.

"Tierney no es un científico", se irrita Chagnon, refiriéndose a la cuestión de la manipulación de los datos. "Ningún científico serio ha dudado nunca de mis datos."

El argumento de Tierney sobre el sarampión también ha levantado críticas. Thomas N. Headland, del Instituto de Lingüística Summer de Dallas, obtuvo documentos de misioneros protestantes que indican que el brote de sarampión precedió la llegada de Chagnon y Neel. Y varios expertos en vacunas objetan que aunque los efectos secundarios de la vacuna Edmonston B hayan sido graves, sin ella muchos más yanomamö hubieran muerto.

Pero incluso aquellos que lo defienden a capa y espada admiten que Chagnon no tiene un historial sin tacha. Hacia a 1991 comenzó a colaborar con Charles Brewer-Carías, un controvertido naturalista venezolano y buscador de oro, y Cecilia Matos, la amante del presidente Carlos Andrés Pérez. A Chagnon le impedían investigar en aquella época, y estos intentos fueron su último recurso, recuerda Raymond Hames.

Por su parte, Chagnon sigue en sus trece sobre el modo en que realizó el trabajo que marcó su vida. "No estoy avergonzado de lo que he hecho. Creo que he obtenido uno de los más significativos e inauditos archivos y colecciones de datos antropológicos que hubieran podido recogerse en esta clase de sociedad", declara.

Incendios forestales

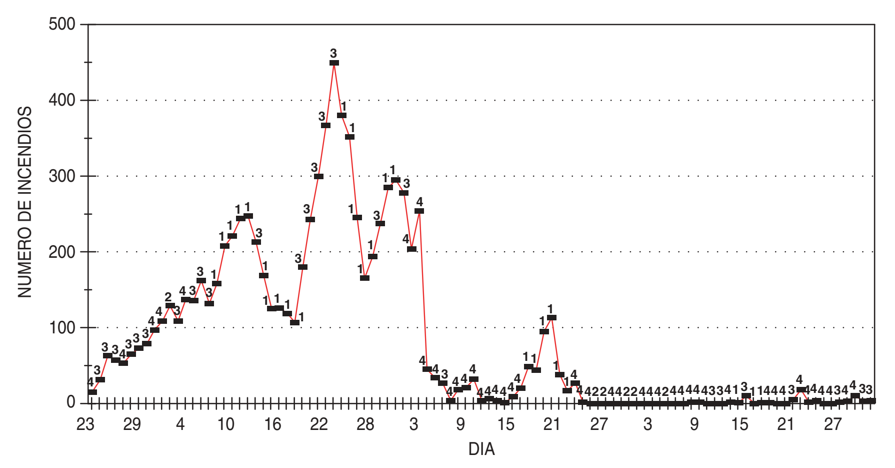
Modelo predictivo

Los incendios forestales constituyen un problema de importancia capital en el panorama ambiental español. Además de las bajas humanas, cada año se contabilizan cientos de miles de millones de pesetas en planes de prevención y en pérdidas. Lo que todavía no se computa son los inmensos daños ambientales derivados de la reducción de la masa forestal y alteración en la concentración de CO_2 en los bajos niveles atmosféricos. Por cada tonelada de material vegetal que arde se pueden ir a la atmósfera entre 30 y 40 kg de dióxido de carbono, que podría haber absorbido en buena parte el bosque quemado.

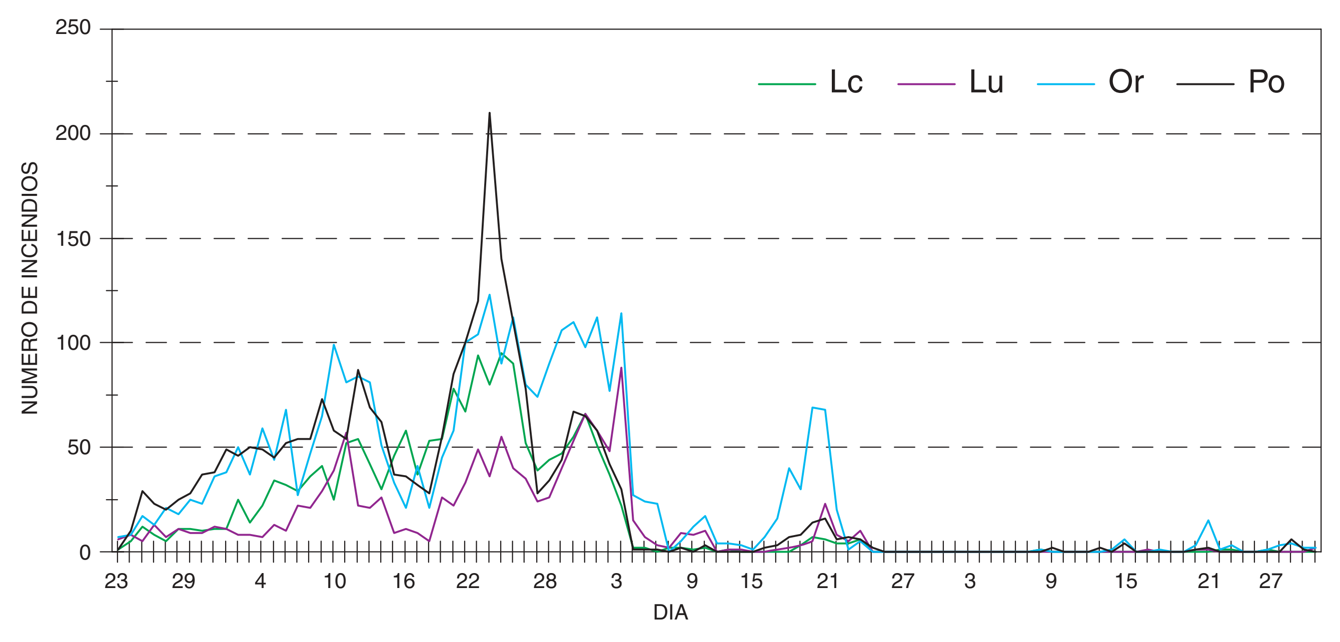
La lucha antifuego debe comprender tres aspectos fundamentales: prever, detectar y apagar. Es la divisa que ha guiado al experimento Alamo-98, diseñado por el grupo investigador que desarrolla el proyecto CICYT (I+D) AGF97- 863 y llevado a cabo en colaboración con la Subdirección de Defensa contra Incendios de la Junta de Galicia.

Los incendios forestales, en general, no acontecen al azar. Si consideramos cada una de las cuatro provincias gallegas y observamos las series temporales de números de incendios diarios veremos que guardan un alto paralelismo en la evolución temporal. Aunque difieran las causas, la sincronía es manifiesta. Provincias con características orográficas distintas, suelos heterogéneos, vegetaciones varias y, sin embargo, presentan sincronismo de fuego. Cuando hay muchos incendios, hay muchos en todas; cuando hay pocos, hay pocos en todas.

¿Cuál es el elemento común que genera tal sincronía? El estado del suelo, entendiendo por tal el material combustible y su grado de com-



1. Se representa el número de incendios registrados cada día (ordenadas y abcisas) *con el tipo de día respectivo* (en el punto correspondiente). *La persistencia de días Tipo I y III elevan el nivel de incendios. Cuando aparecen los días tipo IV, un auténtico frenado a la actividad del fuego, la curva cae a valores bajos*



2. La actividad de fuego es síncrona en las cuatro provincias. Sobre la gestión de lucha contra incendios, parece oportuno disponer de medios repartidos, pues las cuatro provincias presentan actividad

bustibilidad, parecería determinante. Pero los incendios no se dan en los suelos más secos. En cualquier bosque siempre hay zonas de fácil ignición y otras reacias. En Galicia, tras períodos de sequía previa, los incendios tienden a multiplicarse con superficies quemadas mayores.

Los incendios aparecen por oleadas. En pocos días podemos pasar de un número bajo a una cifra espectacular. El estado del suelo no cambia con tanta rapidez. El elemento común generador de la sincronía aludida debe estar en las condiciones meteorológicas. Pero, ¿qué condiciones meteorológicas?

Si elegimos las de superficie encontraremos valores dispersos debidos al efecto costero y otros, que nos llevarán a una situación tan confusa como en el caso del suelo. Deben ser las condiciones que describan una escala espacial del orden de 200×200 km^2. La meteorología es una ciencia de escalas espaciotemporales. Según nos vamos elevando en la columna atmosférica los valores de cualquier parámetro son representativos de áreas horizontales mayores. Es lo que se denomina el cono truncado invertido de representatividad.

Nuestro modelo considera el estrato 850-700 hPa y el nivel de 850 hPa para determinar la estabilidad y la humedad de la atmósfera, respectivamente. La estabilidad revela la facilidad con que los movimientos ascendentes acontecen; a menor estabilidad, ascendencias más fáciles. La quema de un zarzal produce llamas de distinta altura si se produce en días de distinta estabilidad. Los días con baja estabilidad tienden a presentar más incendios.

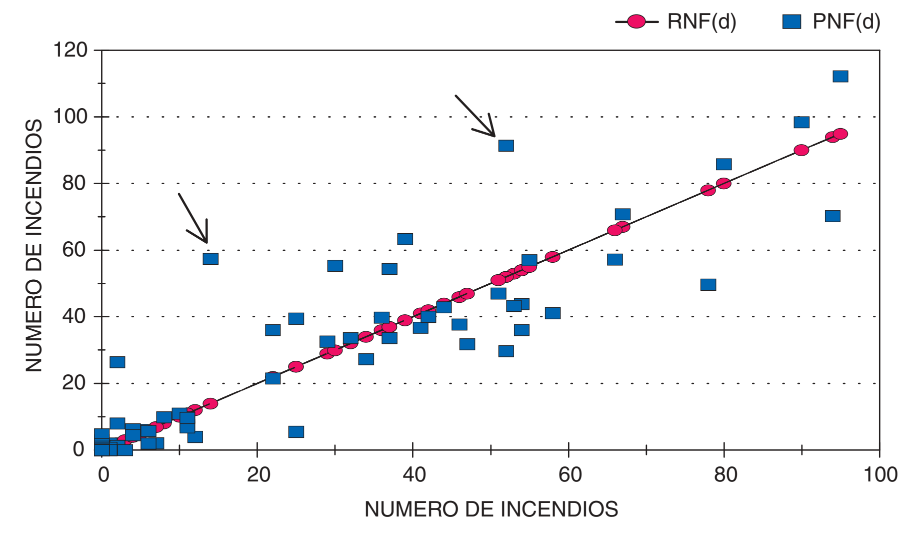
Los días secos fomentan la evapotranspiración en la cubierta vegetal, con la disminución consiguiente del contenido en agua líquida. Si hay menos contenido líquido, se absorberá menos calor para el cambio de estado líquido-vapor, que es elemento debilitador del fuego.

La estabilidad y la humedad se consideran parámetros homodimensionales. En nuestro trabajo, a las 00.00 horas de cada día se evalúan a partir de los datos del radiosondeo estándar que lleva a cabo el Instituto Nacional de Meteorología en La Coruña. Podemos así hablar de cuatro tipos de día: tipo I, inestables secos; tipo II, inestables húmedos; tipo III, estables secos; tipo IV, estables húmedos.

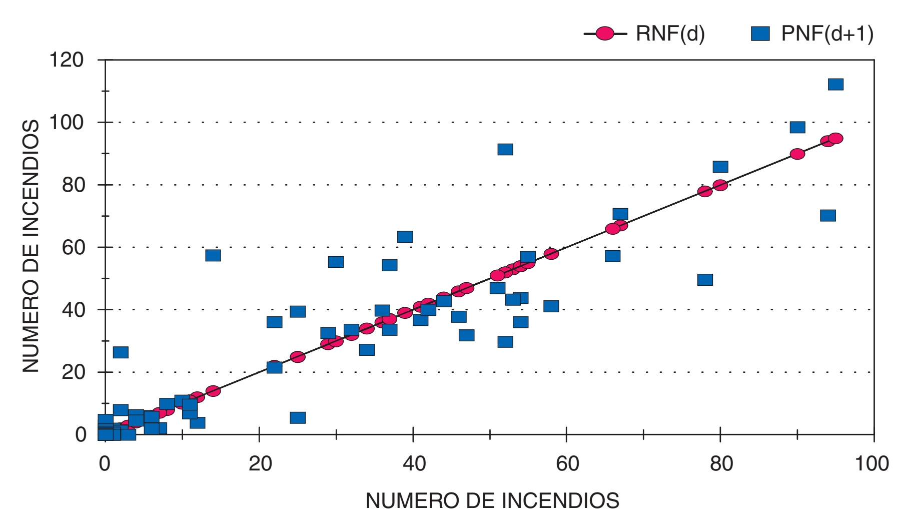
La ordenación de riesgo de fuego es muy alto en los días I, alto en los días III, medio en los IV y bajo en los días de tipo II. A partir de valores medios de números de incendios diarios para cada tipo de día sobre diversos períodos y provincias se habían ya obtenido unos valores normalizados para cada tipo de día. Dichos valores eran proporcionales a 4, 3, 2 y 1 respectivamente.

El número de incendios a registrar, y por tanto a prever, en un día *d* no debe depender exclusivamente de la peligrosidad meteorológica. Ha de incluir también un factor que comprenda el estado del suelo y la actividad antropogénica; aceptamos que este factor varíe suavemente día a día. En concreto, este factor puede calcularse para el día *d* en función de los números de incendios registrados en el lugar los dos días precedentes, descontado el efecto de la peligrosidad meteorológica de dichos dos días.

Nosotros ideamos un esquema iteractivo que se proyecta a plazos de predicción progresivos y que es evaluable mientras dispongamos de predicción meteorológica para las asignaciones de normalizador de riesgo. Dicha predicción meteorológica es posible para Galicia a partir de campo de predicciones dado por el Centro Europeo para la Predicción a Medio Plazo. Los resultados obtenidos con el experimento Alamo-98 confirmaron los puntos de partida.



3. Calidad gráfica de predicción para el día. Se puede observar que los mayores errores (flechas) *lo son por exceso* (falsa alarma). *La correlación predicción-registro presenta un valor R2 = 0,85, que denota una buena calidad predictiva*



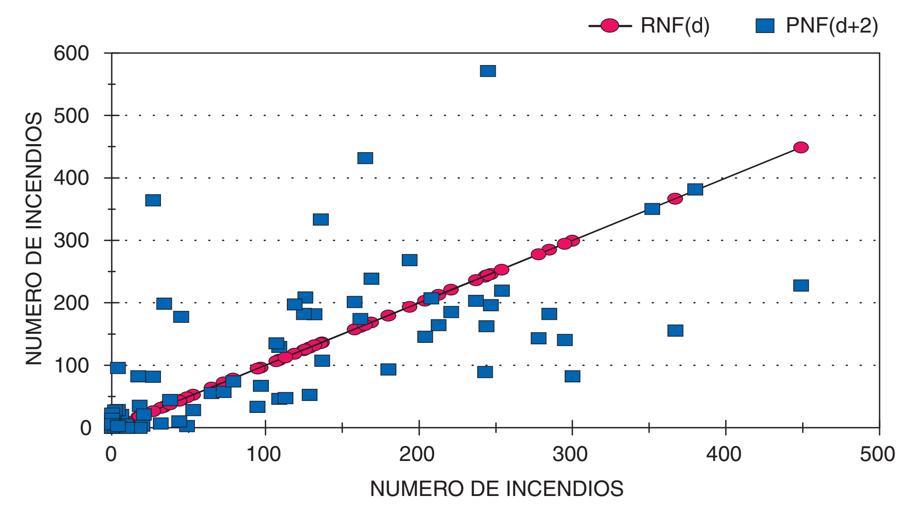
4. Calidad de predicción para el plazo de un día. Los valores PNF (d + 1) fueron dados los respectivos días d – 1. En este caso el modelo tiende ligeramente a la falsa alarma. La correlación registro-predicción es R2 = 0,76, suficientemente aceptable

TIPO DE DIA	I	II	III	IV
MEDIA	153,8	21,5	124,0	26,1
N.° DE DIAS	26	6	26	43
N.° DE INCENDIOS	3998	129	3225	1122

5. Reparto de días e incendios según tipo a lo largo del período. Galicia

En los 26 días definidos a las 00.00h como tipo I se registraron 3998 incendios forestales, lo que significa una media de 154 incendios por día de ese tipo. Idéntico número de días tipo III se registraron en los que acontecieron 3225 incendios. En los 43 días del tipo IV se registraron 1122 incendios, mientras que en los sólo 6 días del tipo II hubo 129 incendios. La sequedad (Tipos I y III) se acentuó mucho, si bien la estabilidad aparece nítidamente marcada (a menor estabilidad más incendios en el dominio seco y menos incendios en el dominio húmedo). Esta inversa dependencia con la estabilidad según sea el dominio seco o húmedo era lo esperado.

De acuerdo con nuestro modelo las grandes avalanchas de fuego pueden preverse con un buen nivel de acierto 48 horas antes. Téngase presente que los pronósticos son dados al comienzo del día y los incendios, en general, acontecen en la segunda parte del día.



6. Calidad de las predicciones a dos días de plazo para Galicia entera. Los errores notables se presentan en 10 o 12 días, esto es, en un 10 % del período del experimento. Además, dichos errores son más notables en exceso (falsa alarma) que en defecto

El segundo objetivo del experimento Alamo-98 consistía en facilitar la predicción del número de incendios forestales diario en cada provincia gallega y en Galicia entera. Las predicciones, que se emitían a primera hora de cada día *d*, eran para el propio día y los dos siguientes. Para evaluar la calidad de una predicción existen determinados modelos que, en definitiva, implican que entre la serie prevista y la de registros haya un alto coeficiente de correlación (paralelismo de las series), similar desviación estándar de ambas (idéntica dispersión) y similar valor medio.

Para un más rápido análisis de bondad predictiva, conviene, sin embargo, usar una gráfica en la que simultáneamente en ordenadas y abcisas se representan los valores registrados (que definen la bisectriz) y, además, en ordenadas se representan los valores predichos correspondientes. El error de predicción es la diferencia de ordenadas entre cada valor predicho y la recta de registros. Si las predicciones tienden a situarse por encima de la recta, el modelo tiende a la falsa alarma. Por el contrario, si las predicciones tienden a estar por debajo, el modelo cae en predicción corta. En predicción operativa de desastres es más aceptable lo primero que lo segundo.

Idéntica información puede deducirse de la predicción a plazo de un día, si bien, como es natural, la calidad predictiva disminuye. En cuanto a las predicciones a dos días de plazo se pierde calidad predictiva, pero consideradas como un estimador su utilidad es aconsejable.

La conclusión a todo ello es que los incendios forestales no constituyen un proceso absolutamente imprevisible. La variabilidad día a día de los números de incendios puede ser interpretada en términos de condiciones meteorológicas, sin que ello suponga que las causas de los incendios puedan ser de variada índole. En definitiva, sean éstas cuales sean, aparecen catalizadas por las condiciones de estabilidad y sequedad de la atmósfera. En la medida en que puedan ser previstas estas características de la atmósfera iremos por delante del fuego.

LUGAR	PNF(d)	PNF(d+1)	PNF(d+2)
LA CORUÑA	0,92	0,88	0,82
LUGO	0,80	0,68	0,55
ORENSE	0,83	0,77	0,64
PONTEVEDRA	0,85	0,75	0,65
GALICIA	0,89	0,83	0,72

7. Valores de los coeficientes de correlación para los diferentes plazos y provincias

A. GARCÍA DIEZ,
L. RIVAS SORIANO,
F. DE PABLO DÁVILA
y EULOGIO L. GARCÍA DIEZ
Dpto. de Física General
y de la Atmósfera,
Universidad de Salamanca

Contaminación urbana

Medición in situ *por espectroscopía láser*

En los últimos años, debido a la sensibilización de los problemas relacionados con el ambiente, ha adquirido interés creciente la determinación de los parámetros químicos y físicos de la atmósfera en grandes ciudades. Madrid, por ejemplo. La capital de España está experimentando una rápida expansión industrial y urbana, que comporta un crecimiento extraordinario del transporte público y privado que ha de llevarse a cabo a expensas de la salubridad ambiental.

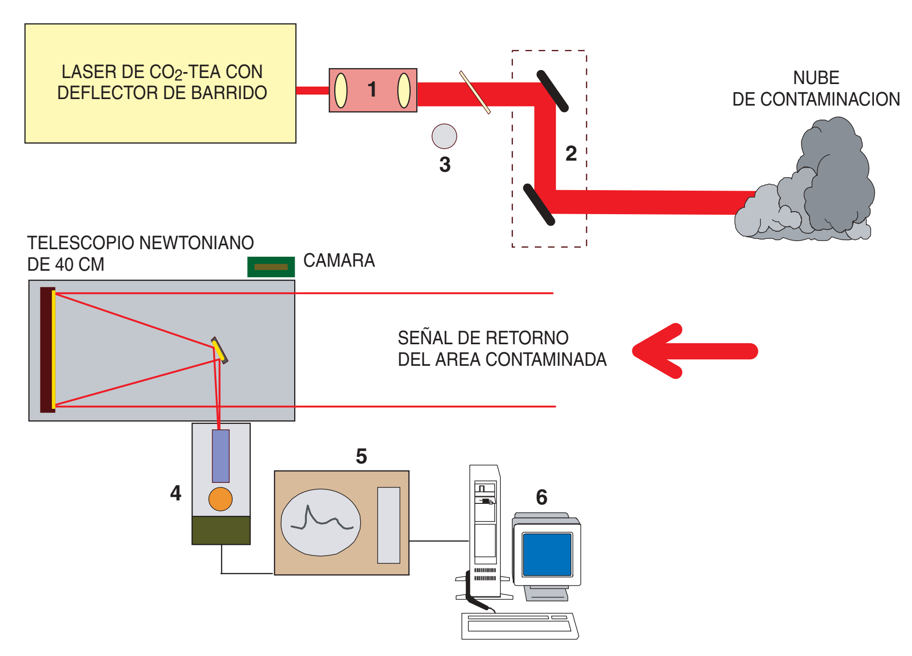
Es obvio que las ciudades de ese tamaño deben poseer los medios para controlar la calidad del aire. En concreto, la posibilidad de medir *in situ* los escapes de algunas instalaciones industriales de alto riesgo, para controlar cualquier fuga química que suponga una amenaza contra la salud.

Combinando parámetros del viento con un mapa de la distribución de la concentración en una sección vertical desde la fuente emisora podemos acometer medidas remotas de la corriente de los gases contaminantes. El sistema Lidar-Dial elabora mapas de distribución de la concentración en tres dimensiones y en tiempo real. Lidar, acrónimo de "Light detection and ranging", comparte principio y origen con el radar, salvo que éste emplea ondas de radio y aquél de luz.

La técnica Lidar, o la absorción diferencial por Lidar (Dial), se basa en la absorción selectiva de la luz por moléculas y átomos. En efecto, todos los átomos y moléculas muestran ahí su propia huella dactilar. El principio de operación de la técnica es muy simple: se lanzan dos láseres pulsados a la atmósfera; uno de ellos está seleccionado para ser fuertemente absorbido por la substancia en estudio, mientras que el otro no. Detectada la luz dispersada por la atmósfera se procede a su resolución temporal y, puesto que la velocidad de la luz es conocida, a su resolución espacial.

Las señales de las dos longitudes de onda se procesan y comparan en un ordenador. Así se obtiene un intervalo con resolución espacial de la concentración del gas contaminante. Debido a que muchos gases absorben eficazmente, este método posee una finísima sensibilidad para la determinación de trazas de algunos gases contaminantes.

En este campo, la Unidad de Láseres y Haces Moleculares del Instituto Pluridisciplinar de la Universidad Complutense de Madrid ha diseñado y construido un láser CO_2-TEA basado en absorción diferencial en infrarrojo con la técnica Lidar (Dial), dada su facilidad para la detección y medida *in situ* del grado de contaminación. Lo aplicamos para comprobar la calidad del aire de Madrid.



1. Esquema descriptivo de la estación Lidar-Dial de CO_2. Consta de un sistema de expansión/obturación del haz (1), *detector* (2), *espejos de direccionamiento* (3), *sistema de detección opto-electrónico* (4), *unidad de adquisición de datos* (5), *almacenamiento y procesamiento de datos* (6)

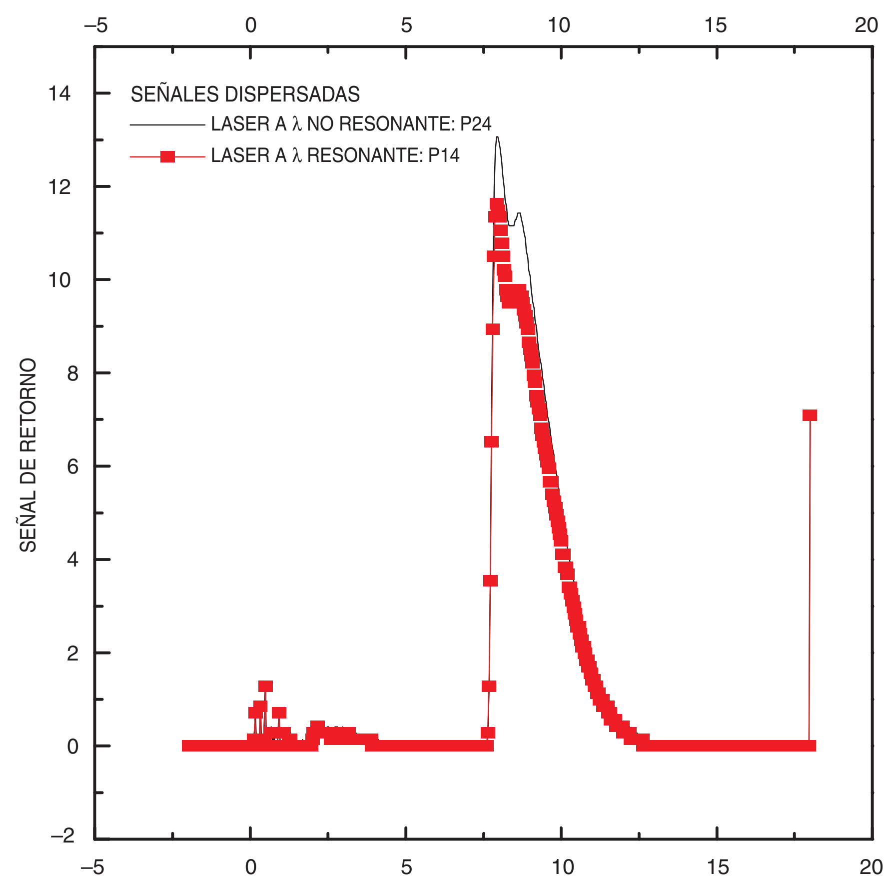
La elección de un láser de CO_2 como base del sistema Lidar se fundamenta en que la transmisión de la radiación electromagnética a través de la atmósfera, en el intervalo de longitudes de onda de dicho láser, está limitado fundamentalmente por la absorción molecular y, en menor medida, por la absorción y dispersión de aerosoles.

La dispersión en el intervalo de longitudes de onda del láser de CO_2 se debe a los aerosoles, siendo despreciable la de origen molecular. Los láseres de CO_2 desempeñan una importante función en la medición de la contaminación, porque su espectro de emisión en el intervalo de 9-11 µm cae en la ventana más amplia de la atmósfera (8-14 µm) y se solapa también con el espectro de absorción de hidrocarburos, ozono, amoniaco y otras moléculas. Por último, la operación de la técnica Lidar en el espectro infrarrojo encierra mucho menos riesgo para la vista que el uso de longitudes de onda del espectro visible.

El resonador óptico del láser es de un solo paso, con diseño tipo Littrow montado en una red de difracción de 150 líneas/mm para la selección de cerca de 50 líneas de alta energía del láser de CO_2-TEA. El láser tiene una estabilidad entre pulso y pulso tal, que el 90 % de los pulsos alcanzan energías que difieren en promedio en un ± 5 %.

La mayor constante de tiempo inherente a los pulsos del láser de CO_2, cuya cola debida al nitrógeno puede extenderse por varios microsegundos, limita la resolución del Lidar a algunos cientos de metros, a menos que se adopten la técnica oportuna (deconvolución de pulso). Nosotros evitamos ese escollo con el uso de un plasma para cortar el pulso. La resolución alcanzable con estos pulsos cortados es de 15 metros, que es 30 veces mejor que la lograda con los pulsos originales con la cola de nitrógeno.

Para realizar el alineamiento de toda la óptica, tanto de transmisión como de recepción, empleamos un láser de HeNe. Se trabaja, en efecto, con toda una batería de elementos ópticos para ajustar el nivel de potencia y adaptar la pérdida experimentada por la radiación dispersada en su camino de propagación.



2. Ejemplo de la señal dispersada obtenida con nuestro sistema. Se representan señales dispersadas normalizadas para las líneas P14 (λ_{on} = 9,505 µm) y P24 (λ_{off} = 9,585 µm) del láser de CO_2, usadas para la medida de ozono en una gran distancia de la atmósfera durante un día de junio de 1999 en Madrid

PARAMETROS	ESPECIFICACIONES
Transmisor	
Láser	Sintonizable, pulsado CO2-TEA Lumonics 370XT mejorado hasta 10 Hz
Anchura de pulso	Pulso no cortado: 3,5 µs Cortado con un plasma: <70 ns
Energía	1,2 J (ganancia del pico en P20)
Frecuencia de repetición	2-10 Hz
Longitud de onda	9,2 a 10,8 µm
Sintonización	Controlado por un ordenador
Módulo receptor	
Telescopio	Newtoniano 1830, F#/4,5
Campo de visión	5 mrad
Detector	EG&G LN refrigerado: J15-D12
Adquisición de datos	
Ordenador	PC 200MHz, 32 Mb Ram
Lenguaje de programación	C^{++}
Digitalización	Tektronic TDS 540-200 MHz, 8 bits
Interfaz	IEEE-488

Podemos apuntar el Lidar hacia un objetivo físico o enviarlo hacia el espacio abierto, con sólo cambiar la trayectoria desde la mesa de soporte. Para medir las concentraciones de contaminantes a ciertas distancias, se utilizan objetivos topográficos —paredes de edificios o torres de transmisión—, que dispersan la radiación, colectada por un telescopio newtoniano de 40 cm de diámetro.

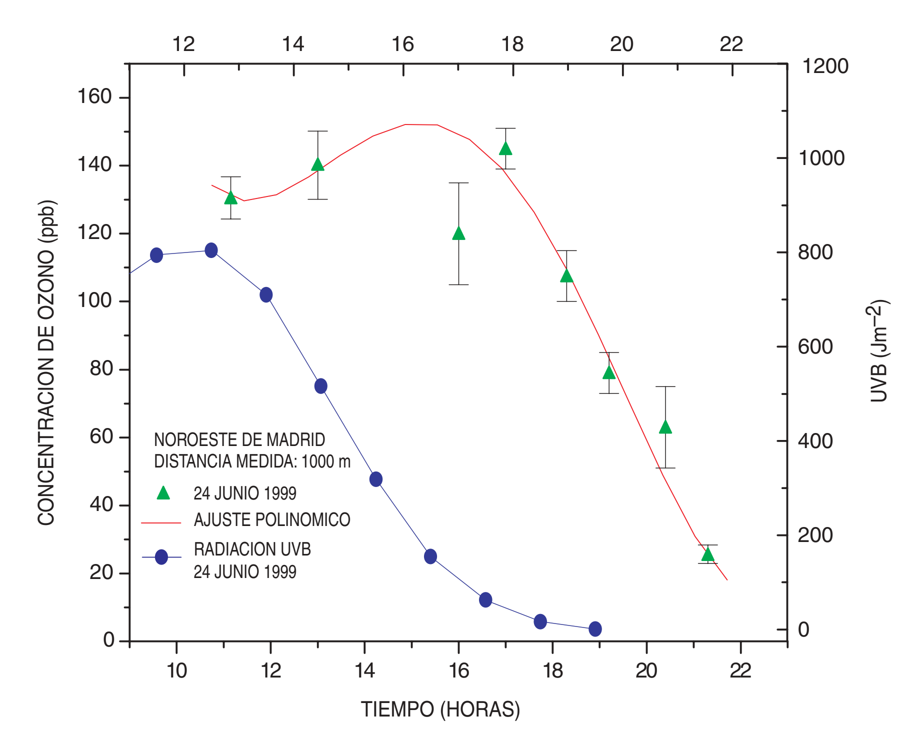
Nos valemos de un juego de lentes de enfoque para ampliar el campo de visión del receptor, al objeto de que éste sea mayor que la divergencia del haz del láser. Con un preamplificador se amplifica la señal y se evita que el ruido del detector limite la representación de las señales. La salida del preamplificador está conectada a un osciloscopio digital de dos canales, a su vez conectado en red a un ordenador para procesar y almacenar los datos.

El software de adquisición y procesamiento de los datos se ha ideado en el Instituto Pluridisciplinar de Madrid. Para cada pulso se realiza una medida completa de absorción diferencial. La relación señal/ruido (SNR) puede mejorarse, promediando sobre *n* pulsos con una frecuencia de disparo del láser de 10 hertz.

Nuestro grupo ha prestado particular atención a las medidas de ozono. La elección de este gas vino aconsejada por su importancia máxima en la troposfera y su carácter de especie contaminante muy nociva. Su fotólisis por radiación ultravioleta, en la banda de longitudes de onda entre 300-310 nanómetros, desencadena a escala global casi toda la actividad fotoquímica en la troposfera.

Se sabe poco acerca de la respuesta en la concentración de ozono, sea a escala global o regional, por la variación de las condiciones meteorológicas y de la actividad humana. El ozono es, en sí mismo, una especie tóxica, que se observa de vez en cuando en posiciones lejanas en niveles de concentración que exceden las 120 partes por billón por hora. Presenta una fuerte banda de absorción a 9,6 µm, por cuyo motivo contribuye al efecto "invernadero"; las variaciones en su abundancia en el medio durante prolongados períodos de tiempo pueden tener consecuencias en la climatología. La posibilidad de tales cambios depende del papel relativo de la fotoquímica y el transporte en la formación o consumo de ozono.

Los resultados de medidas de ozono realizadas durante un día entero (24



3. Distribución de la concentración del ozono en la región noroeste de Madrid en función del tiempo durante el 24-6-1999. También se representa la distribución de la radiación UVB del mismo día. La línea P14 es más fuertemente atenuada por el ozono del ambiente, por ser mayor su coeficiente de absorción (12,7 atm^{-1}.cm^{-1}). La señal dispersada debida a los aerosoles decrece con el aumento de la longitud o rango de la medida. Así, 1 km de alcance hace que caiga dentro del ruido del sistema. La señal dispersada por una pared a 1 km de distancia es aproximadamente 300 veces mayor que la suma del ruido y la señal dispersada por los aerosoles en ese rango. El segundo hombro en la señal resulta del perfil característico del pulso del láser de CO_2. Se trata de la cola del nitrógeno, que dura unos 2 µs y generalmente sigue a los principales 100 nanosegundos de ganancia en el pico del pulso del láser de CO_2-TEA. Dicha cola no afecta al promedio de las medidas de concentración de ozono. Sin embargo, es necesario cortar el pulso de nitrógeno si se requieren medidas con resolución espacial

de junio de 1999) se muestran en la figura 3. La curva representa la mayor y menor concentración que hemos medido durante esa jornada, caracterizada por una muy baja actividad meteorológica reflejada en un bajo grado de humedad y velocidad del viento. El área medida por el Lidar no es un área industrial; por tanto, la principal fuente de contaminación sólo puede atribuirse a la emisión de los vehículos y a una muy pequeña cantidad transportada por al viento desde el sur de Madrid, donde se concentra la industria pesada. Las medidas fueron realizadas en varios días entre aproximadamente las 10.00 y 17.00, y la desviación estándar varía entre el 1 % y 6 %. La desviación estándar media del 3 % es equivalente a una incertidumbre en la medida de 0,4 ppb de ozono cuando se promedia sobre 100 pulsos.

El perfil del ozono muestra esta misma conducta en muchos días y semanas consecutivas. Un pequeño aumento de la concentración durante las últimas horas de la mañana, llegando a un máximo de 150 ppb alrededor de las 14.00 y decayendo a menos de 30 ppb cuando la actividad solar alcanza su más bajo nivel. En atmósferas limpias, normalmente la concentración de ozono es de 10 a 30 ppb en las horas de luz. Este comportamiento confirma que el ozono es un contaminante secundario y se origina debido a la reacción fotoquímica que involucra principalmente a los óxidos de nitrógeno, $NO_{x'}$s, e hidrocarburos en presencia de la radiación solar ultravioleta. Nótese, en este sentido, la correlación entre la concentración de ozono y la radiación ultravioleta mostrada en la misma figura. El retraso en la aparición del ozono se explica por el tiempo necesario para la formación fotoquímica a partir de las distintas reacciones implicadas. Un cambio en el tiempo de desarrollo del ozono se observa normalmente con respecto al NO. Las áreas urbanas más importantes pueden tener concentraciones de ozono por encima de 300 partes por billón.

Las medidas de concentración de ozono *in situ* obtenidas con nuestro sistema Lidar están de acuerdo con las obtenidas en estaciones de medidas localizadas en un punto. La medida de etileno y amoniaco está actualmente en marcha y las concentraciones de estos gases están programadas para medirse en un futuro próximo. (Para nuestro proyecto hemos contado con la subvención parcial de la Dirección General de Investigación de la Comunidad de Madrid.)

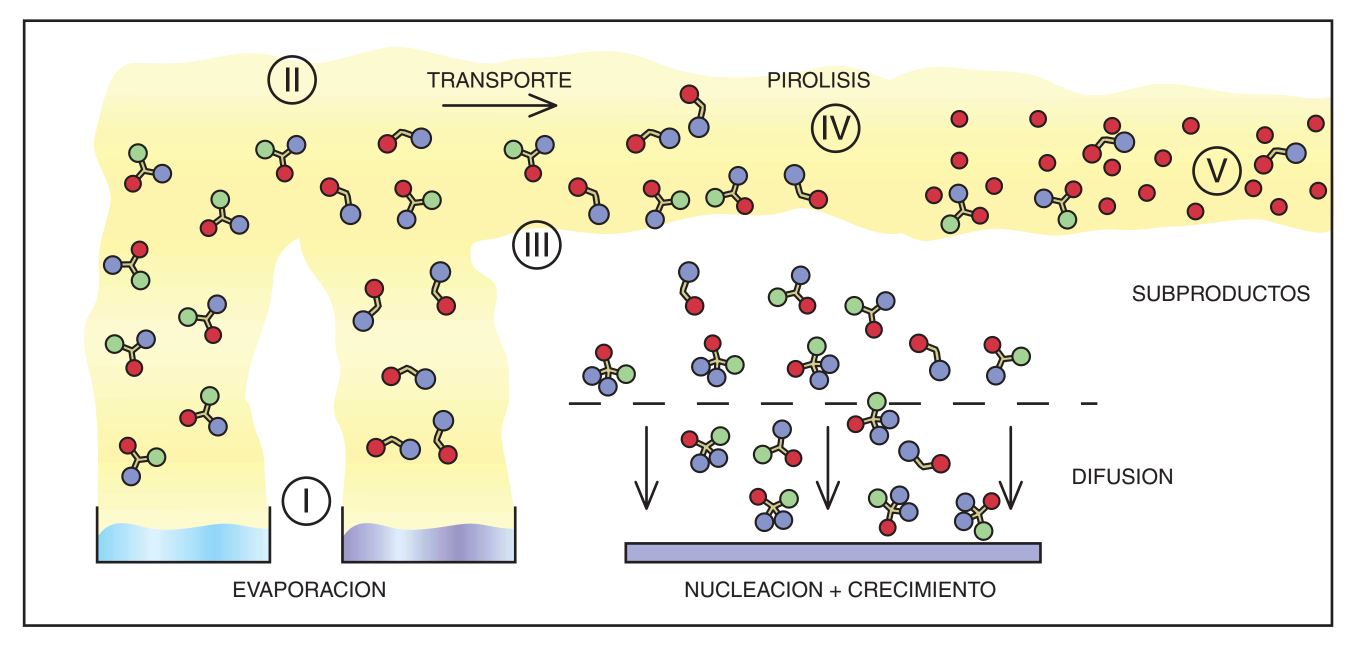
A. GONZÁLEZ UREÑA, T. GASMI,
G. MIÑANA y H. ZEAITER
Unidad de Láseres
y Haces Moleculares.
Instituto Pluridisciplinar.
Universidad Complutense
Madrid

Procesos industriales

Deposición química en fase vapor

A la deposición de un material mediante una reacción química de sus precursores gaseosos sobre una superficie mantenida a cierta temperatura se la denomina deposición química en fase vapor. En contacto con la superficie y bajo ciertas condiciones, los precursores se descomponen y reaccionan para formar un depósito sólido. Luego, se eliminan los subproductos de la reacción. El proceso puede realizarse a presión atmosférica o a baja presión.

La versatilidad constituye una de las grandes ventajas de esta técnica, conocida por su acrónimo inglés CVD (de "Chemical Vapour Deposition"). Con ese método se fabrican películas delgadas y recubrimientos de metales, semiconductores y óxidos en forma cristalina, policristalina o vítrea. Otra ventaja radica en el bajo costo del equipo usado en su montaje, en comparación con los equipos de vacío empleados en las téc-



Esquema de un proceso CVD mediante precursores organometálicos

nicas físicas de deposición a partir de fase vapor.

Los equipos CVD pueden adaptarse a distintas escalas para aplicaciones industriales y se acomodan a sistemas de deposición en continuo de cintas e hilos, por ejemplo. Buena parte de la industria de recubrimientos protectores, así como de la microelectrónica, se basa ya en técnicas de deposición derivadas del CVD.

Al darse la deposición en fase vapor, pueden beneficiarse de la técnica el recubrimiento de grandes superficies y geometrías complicadas (hilos o interior de tubos); por contra, en las técnicas físicas la difusión de las especies hacia el substrato es direccional y se producen efectos de sombra en el proceso de depósito. Además, el CVD permite altas velocidades de crecimiento, fácil control sobre la estequiometría de la película y su morfología, así como el desarrollo de multicapas con interfases abruptas. Pero la técnica CVD no está exenta de dificultades, derivadas sobre todo de los múltiples parámetros que deben atenderse y dominarse.

Una vez evaporados los precursores que contienen los elementos químicos constituyentes del material a depositar, el proceso CVD debe culminar otras etapas: formación de la mezcla gaseosa precursora, transporte de la mezcla a la zona de reacción mediante un gas portador inerte, formación de la película y evacuación de los subproductos de la reacción.

Para evitar fenómenos de condensación, descomposición o incluso depósito, hay que tomar precauciones durante la etapa de transporte de la fase gas a la zona de reacción. En cuanto la fase gas alcanza dicha región, se producen reacciones que dan lugar a las unidades de crecimiento, absorbidas por la superficie. La energía de activación de la reacción química puede proceder de una fuente térmica, de una descarga, de una lámpara ultravioleta o de un haz láser.

El proceso de formación de la película comienza con la difusión de los reactantes hacia el substrato. Tras la absorción de las especies reactivas sobre el substrato, se desarrollan reacciones químicas de las especies absorbidas y se produce la migración de las mismas sobre la superficie para formar núcleos estables, que serán la base del crecimiento cristalino. Por último, se procede a la difusión y evacuación de los subproductos.

Entre todas las etapas de que consta el crecimiento de la película, la más lenta determina la velocidad de crecimiento de la lámina. Vinculados, respectivamente, a la difusión de los reactantes hacia el substrato y a la reacción en la superficie se distinguen dos regímenes extremos de crecimiento, a saber, el control por transferencia de masa y el control por la reacción química superficial.

En el control por transferencia de masa, controlado por difusión, la velocidad de reacción es muy alta y, por tanto, el ritmo de crecimiento viene determinado por la velocidad de transferencia de especies reactivas hacia el substrato. La velocidad de crecimiento es prácticamente independiente de la temperatura de deposición, puesto que los coeficientes de difusión de los reactantes no dependen fuertemente de la temperatura. Además, puesto que el aporte de materia por difusión no es alto, la sobresaturación en superficie será baja y se favorecerá el fenómeno de la difusión superficial. Se obtiene así un buen crecimiento cristalino. Con un substrato adecuado se puede conseguir, incluso, un crecimiento epitaxial.

En el control por reacción química superficial, la velocidad de transporte por difusión es muy alto, si la comparamos con la velocidad de la reacción química. La velocidad de crecimiento viene determinada por la cinética de la reacción, que depende de la temperatura de depósito. Se privilegia el fenómeno de nucleación sobre el de difusión. Y se obtienen depósitos policristalinos o amorfos.

La presión y la temperatura de la fase gas determinan los modos de difusión, de reacción o ambos. Esos dos parámetros fijan, pues, el modo de crecimiento. El régimen cinético del párrafo anterior está caracterizado por bajas temperaturas de depósito o bajas presiones, mientras que el régimen controlado por la difusión se manifiesta a altas temperaturas o presiones.

La búsqueda de un precursor adecuado está en la base de la obtención de una buena película preparada por CVD. Un precursor debe gozar de estabilidad térmica durante el proceso de calentamiento, volatilidad, estabilidad química y pureza. Las cuatro propiedades en grado notable. Se requiere, además, la formación de

subproductos inertes. En el caso de depósito de capas formadas por distintos elementos importa, asimismo, que los respectivos precursores exhiban una volatilidad similar.

Se emplean precursores de muy diversa índole. Como ejemplo recordaremos diferentes familias de reactantes volátiles: haluros (cloruros, fluoruros, bromuros) altamente reactivos que se hidrolizan de forma espontánea a temperatura ambiente y necesitan condiciones de seguridad extremas, lo mismo en su almacenamiento que en su manipulación; hidruros como el diborano, amoniaco, silano; metano, propano y butano, entre los hidrocarburos, y compuestos organometálicos que, por sus particulares características, dan nombre a una técnica derivada del CVD y conocida como MOCVD (acrónimo inglés de Metal Organic Chemical Vapour Deposition).

La importancia de este último estriba en que cualquier elemento metálico, sin excepción reseñable, posee compuestos organometálicos volátiles que se descomponen, a temperaturas bastante bajas por el calor, sobre la superficie del substrato o en sus cercanías. Esta reacción de pirólisis libera al elemento químico que transporta, generando CO_2 y H_2O.

Los primeros reactores se basaban en el principio de la evaporación térmica de los precursores. Los problemas de estabilidad térmica y química que presentaban se han ido solucionando con nuevos procesos de transporte de precursores hacia la zona de reacción sin sufrir degradación o pirólisis.

Dentro de las modificaciones en la zona de producción de la fase gas destaca la evaporación flash de una mezcla de sólidos, técnica que consiste en la obtención cuasi-instantánea de la fase gas reactante mediante la evaporación simultánea de varios precursores sólidos. Se consigue gracias a una importante variación de temperatura, durante un tiempo muy corto, en una zona cercana a la de mezcla. El control de la proporción de los precursores que alcanzan la zona de evaporación es uno de sus principales inconvenientes, dificultad que se orilla con la introducción directa de los precursores en la forma de mezcla y no por separado.

Una técnica alternativa a la evaporación flash es la de inyección. Los precursores se disuelven antes y la solución obtenida se introduce en la cámara de reacción en forma de aeorosol. La presencia de una gran presión parcial de disolvente en la mezcla reactante es su principal inconveniente.

Por lo que concierne a la zona de reacción, se busca, con su modificación, aumentar la superficie de depósito. En eso justamente estriba uno de los alicientes más atractivos del CVD.

El uso de esta técnica para la preparación de nanopartículas, de películas nanoestructuradas y de depósitos de materiales orgánicos demuestran su extrema versatilidad.

J. SANTISO, G. GARCÍA,
J. CARO y ALBERT FIGUERAS
Instituto de Ciencia de Materiales
de Barcelona. CSIC

Avances en bioquímica

El gen de la LPI

Los aminoácidos, componentes primarios de las proteínas, intervienen en los procesos de neurotransmisión y en numerosas reacciones metabólicas. Por su carácter hidrofílico les está vedado cruzar libremente la membrana celular. Se requieren proteínas transportadoras que reconozcan, unan y transporten aminoácidos desde el medio extracelular hacia el interior de la célula, o en sentido inverso. Sin esos transportadores de aminoácidos no habría metabolismo posible.

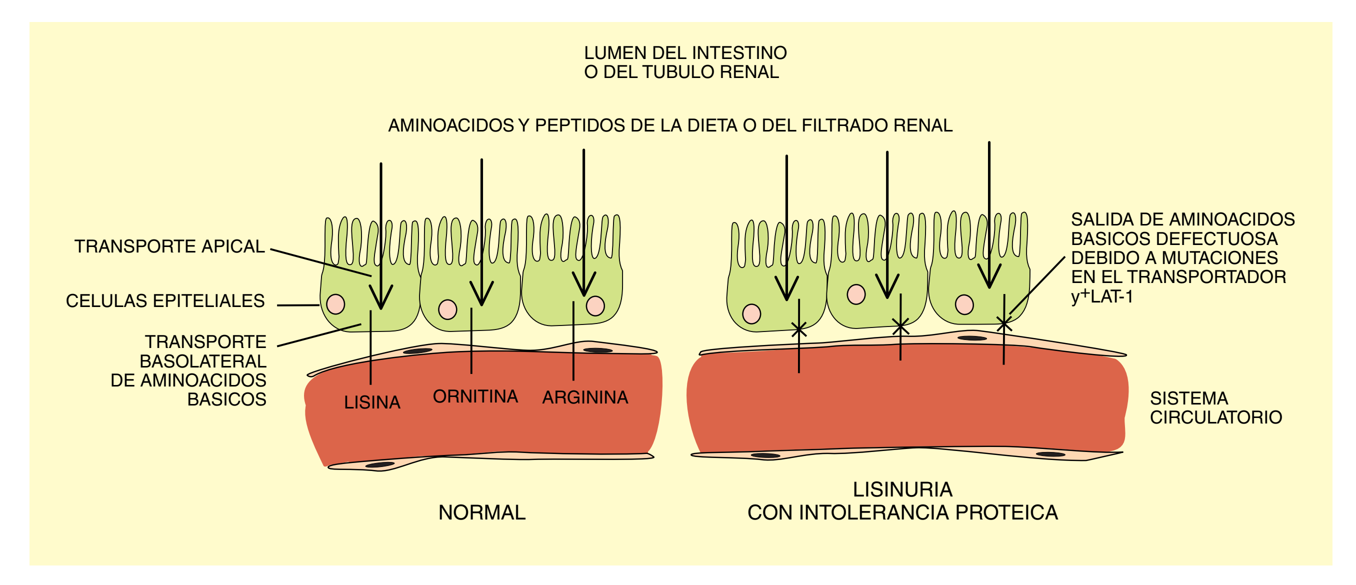
Se han identificado varios. Se agrupan en familias de acuerdo con el criterio de semejanza en secuencia y función. Cada familia presenta especificidad de substrato y una distribución tisular y celular muy variada. Nuestro grupo de la Universidad de Barcelona ha identificado seis nuevas proteínas humanas pertenecientes a una nueva familia de transportadores de aminoácidos. Los componentes de esta familia se caracterizan por dos notas distintivas. Se unen a una subunidad pesada, denominada bien 4F2hc (cadena pesada del antígeno de superficie 4F2, también conocido como CD98) o rBAT, mediante puentes disulfuro, formando un complejo heteromérico funcional; en segundo lugar, presentan una actividad de transporte por intercambio, es decir, a la vez que transportan un aminoácido hacia un lado de la membrana plasmática transportan otro hacia el otro lado.

En la caracterización funcional de uno de los miembros de esta nueva familia de transportadores, denominado y^+LAT-1, se puso de manifiesto que la proteína en cuestión exportaba aminoácidos básicos hacia el medio extracelular, a la vez que importaba aminoácidos neutros, junto con sodio, hacia el interior celular (actividad de transporte denominada y^+L). Esta proteína opera en el riñón, intestino y otros tejidos.

Nuestro grupo localizó 4F2hc en la membrana basolateral de las células epiteliales de riñón, y observó el desarrollo de la actividad y^+L en esa parte de la membrana. De la investigación se desprendía que el transportador podría intervenir en el proceso que conduce a la absorción intestinal y la reabsorción renal de aminoácidos básicos, concretamente en la membrana basal. La localización cromosómica del gen de y^+LAT-1 (denominado *SLC7A7*), en el cromosoma 14q13.2, coincidía con la región donde se había cartografiado el gen de LPI tras experimentos de ligamiento genético.

En 1965 Perheentupa y Visakorpi descubrieron en pacientes finlandeses una "intolerancia proteica familiar con deficiencias en el transporte de aminoácidos básicos". De esta enfermedad hereditaria de carácter recesivo la mitad de los casos se da en Finlandia. Aunque la sintomatología puede variar, todos los afectados sufren diarreas y vómitos después de ingerir alimentos ricos en proteínas. La incapacidad para la absorción intestinal de la lisina, un aminoácido esencial, conlleva una serie de problemas típicos de malnutrición: bajo desarrollo muscular e inflamación hepática. Los pacientes de LPI presentan alteraciones en el ciclo de la urea, lo que provoca aumentos graves de la concentración de amonio en sangre. Este amonio, producto tóxico residual del metabolismo de los aminoácidos, promueve alteraciones cerebrales y, en algunos casos, conduce al coma y la muerte.

Para demostrar la implicación del gen *SLC7A7* en la LPI, se buscaron mutaciones en pacientes con síntomas claros de esta enfermedad. Un primer estudio mutacional se realizó con un paciente del norte de España. Tras secuenciar el gen *SLC7A7* del enfermo se detectaron mutaciones en ambos alelos. El alelo materno contenía una mutación puntual (1287 $C \rightarrow T$), que producía un cambio de la leucina 334 (conservada en los otros miembros de la familia de transportadores) por una arginina. El alelo paterno contenía una deleción



Defecto en el transporte de aminoácidos en el dominio basolateral del epitelio que produce la malabsorción intestinal y la reabsorción renal defectuosa de aminoácidos básicos en la lisinuria con intolerancia proteica (LPI)

de cuatro nucleótidos (1291delCTTT), que provocaba un cambio de pauta de lectura en la proteína y la aparición de un codon de parada prematuro.

En colaboración con el grupo finlandés abordamos el análisis de mutaciones en enfermos de esa nacionalidad. En ambos alelos de todos los enfermos —fineses— analizados se encontró la misma mutación que correspondía a un cambio de un nucleótido, causante de una maduración del transcrito primario defectuosa que daba lugar a una deleción de diez nucleótidos en el ARNm. Esta deleción provoca un cambio en la pauta de lectura y la aparición de un codon de parada prematuro. Ambas deleciones encontradas impiden que se llegue a producir el tercio C-terminal del transportador. Para la mutación puntual encontrada en el paciente español, se analizó su función y se comprobó que ésta era totalmente defectiva. Estos resultados demuestran que ciertas mutaciones en el gen *SLC7A7* causan LPI.

La identificación del gen responsable de la lisinuria con intolerancia proteica supone un gran avance en el estudio de esta patología. Permite ya la detección molecular de la enfermedad. En Finlandia se espera crear un protocolo de ADN para el diagnóstico perinatal.

DAVID TORRENTS
ANTONIO ZORZANO
MANUEL PALACÍN
Dpto. Bioquímica
y Biología Molecular,
Universidad de Barcelona

Flora mediterránea

Lobeliáceas

El género *Solenopsis*, de la familia Lobeliáceas, es uno de esos grupos de especies sobre los que pocos botánicos han fijado su atención y que, sin embargo, presenta características muy atrayentes para ilustrar la diversificación vegetal y sus relaciones con la distribución geográfica actual y pretérita de la flora, objeto de estudio de la biogeografía.

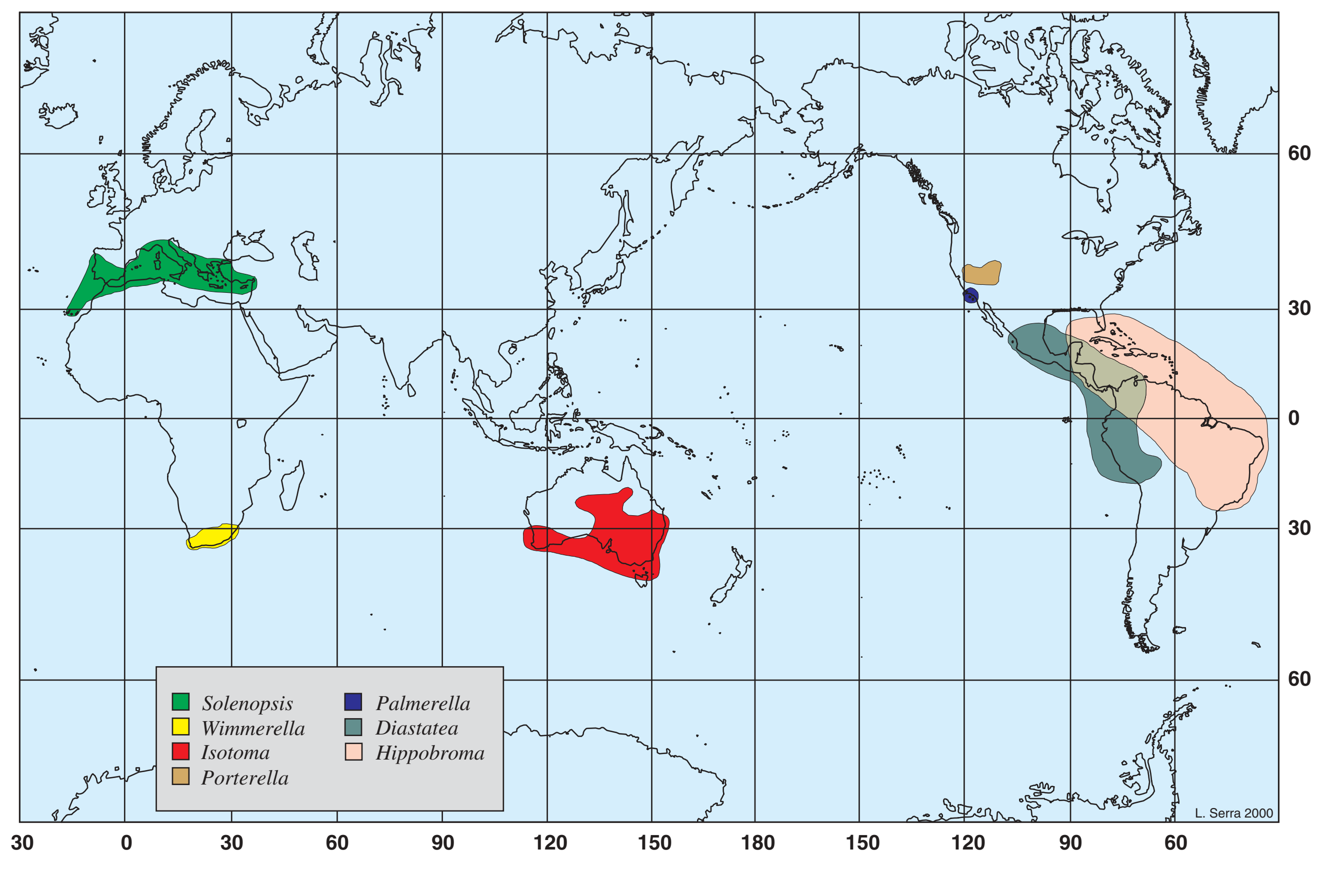
Las Lobeliáceas son plantas de amplia distribución por las zonas tropicales y subtropicales de la Tierra. En esta familia se incluyen unas 1200 especies de aspecto muy variado, desde pequeñas hierbas anuales de pocos centímetros hasta grandes árboles de varios metros de altura. Algunas son acuáticas o de ambientes con alta humedad, otras viven epífitas y las hay que medran en los bosques y páramos tropicales. Se trata de un grupo estrechamente relacionado con las Campanuláceas —la familia de las campanillas—, hasta tal punto que, a menudo, se incluyen en esta última como subfamilia.

El monógrafo alemán Franz E. Wimmer (1881-1961), quien estudió durante más de 50 años ambas familias, agrupó una parte de las lobelias herbáceas en el género *Laurentia* Adans. Pero, recientemente, tras el estudio de diversos caracteres morfológicos (tipo de inflorescencia, biotipo, número de filamentos estaminales libres y su tamaño, microescultura de la testa y forma de las semillas vistas al microscopio electrónico de barrido), se han reivindicado algunos géneros desestimados hasta ahora.

Hoy se reconocen siete grupos con áreas de distribución no coincidentes y con un número de especies bastante reducido. El género *Solenopsis* es exclusivo de la región mediterránea, mientras que otros de morfología similar colonizan otras zonas de clima mediterráneo. Es el caso de *Wimmerella* en Sudáfrica, *Isotoma* en Australia y *Palmerella*, *Porterella* y *Diastatea* en el sudoeste de Estados Unidos y México. Caso aparte es *Hippobroma longiflora*, especie emparentada en lo morfológico con las anteriores, pero cuya distribución se ciñe a parte del reino neotropical.

Centrándonos en *Solenopsis*, este género mediterráneo incluye pequeñas hierbas anuales o perennes, que no sobrepasan 20-30 cm de altura, y que presentan flores de 3-12 mm de longitud, de corolas poco vistosas. Suelen vivir en zonas bastante húmedas, en general sobre suelos ácidos; pero aparecen siempre de forma esporádica. Se trata de un género distribuido por la cuenca mediterránea, que alcanza las islas Canarias.

De los siete taxones conocidos sólo hay uno (*Solenopsis laurentia*) que se presenta desde Canarias hasta Turquía y Líbano, mientras que los demás son de área mucho más restringida: *S. bicolor* sólo se conoce de la parte litoral de Argelia y Túnez, mientras que los otros cinco taxones están presentes en diversas islas del Mediterráneo. Los taxones insulares pueden considerarse vicariantes, ya que ocupan hábitats similares sin llegar a convivir



Areas de distribución de siete géneros de Lobeliáceas

y son próximos taxonómicamente; pero debido al aislamiento geográfico han sufrido paralelamente un aislamiento reproductivo, llegando a diferenciarse como especies independientes. Así, tenemos *S. bivonae*, en el sur de Cerdeña, Sicilia y Chipre; *S. corsica*, exclusiva de Córcega y con algunas localidades en el norte de Cerdeña; *S. minima*, endémica de Mallorca; *S. minuta* subsp. *minuta*, de Creta y muy rara en Sicilia y Cerdeña, y *S. minuta* subsp. *annua*, exclusiva del oeste de Creta.

Al parecer tanto las Lobeliáceas como las Campanuláceas son familias de aparición reciente en el planeta. Las pruebas del registro fósil las sitúan no antes de 40 millones de años atrás, con los continentes situados prácticamente donde están ahora. Este dato podría hacer rechazable la hipótesis de un ancestro común para todos los géneros próximos a *Solenopsis*, a partir del cual y por especiación alopátrica (por aislamiento geográfico) se habrían diferenciado todos y cada uno de ellos. Aunque este patrón pueda ser aplicable a algún caso particular (en los géneros norteamericanos *Palmerella* y *Porterella*), no debe considerarse como modelo general en los restantes. Seguramente, rutas migratorias a través de puentes geográficos hoy inexistentes explicarían las distribuciones disyuntas de algunos de estos géneros muy afines morfológicamente.

Pese a tener orígenes diversos, algunos de estos grupos han desarrollado secundariamente morfologías similares por convergencia adaptativa, debida a la colonización de entornos similares. Recuérdese, por ejemplo, el caso típico de las plantas cactiformes propias de climas áridos, que aunque pertenecen a familias muy alejadas evolutivamente, llegan a desarrollar estructuras idénticas (tallos suculentos, hojas transformadas en espinas y otras).

Una cuestión sugerente que se presenta al estudiar estas lobeliáceas herbáceas es la de su relación con otros géneros de plantas leñosas, incluso arborescentes, existentes en dicha familia, que crecen, sin embargo, en las zonas tropicales de la Tierra (en las islas Hawai existen, al menos, 110 especies leñosas endémicas, algunas de ellas árboles de hasta 15 m de altura). Siendo que la mayor diversidad vegetal está en los trópicos, y es allí donde se yergue mayoritario el biotipo leñoso, no debe extrañar que tradicionalmente se considere este carácter como primitivo (ancestral).

Sin embargo, en el caso de las Lobeliáceas, los datos cariológicos sugieren una interpretación diferente. Se sabe que la mayoría de las especies herbáceas son diploides, mientras que las leñosas son casi en su totalidad tetraploides. Esto podría apuntar a que el carácter "herbáceo-leñoso" debe de haber evolucionado varias veces de modo independiente en distintos grupos, sin que esté relacionado con la modernidad o con el nivel de ploidía. Pero también cabe la posibilidad de considerar la aparición del carácter leñoso de forma secundaria en esta familia.

Los estudios que se llevan a cabo actualmente (en particular la sistemática molecular) sobre otros grupos de especies próximas dentro de las Lobeliáceas evidenciarán sus verdaderas relaciones filogenéticas y ayudarán a su correcta interpretación con relación a la evolución de la familia, así como a averiguar los patrones de colonización geográfica seguidos.

LUIS SERRA LALIGA
Consejería de Medio Ambiente
MANUEL B. CRESPO
Universidad de Alicante

De cerca

Texto: Montserrat Demestre y José Manuel Fortuño
Fotos: M. Demestre, J. M. Fortuño y J. Biosca

Dimorfismo sexual en la gamba

Lo que el vulgo llama gamba y los biólogos *Aristeus antennatus* es un crustáceo decápodo, cuya área de distribución abarca el Mediterráneo y parte del Atlántico, desde la zona de Lisboa hasta las islas de Cabo Verde, en las áreas de influencia de las aguas mediterráneas. Desde el punto de vista comercial, representa una de las especies de mayor rendimiento económico de los recursos pesqueros explotados del *mare nostrum*.

A. antennatus habita en los fondos de fango típicos del margen del talud, más concretamente, de las zonas de los cañones submarinos. La distribución batimétrica de la gamba se extiende desde los 350 m hasta cerca de los 2000 m, si bien su rango de explotación se centra entre los 350 y 800 m de profundidad.

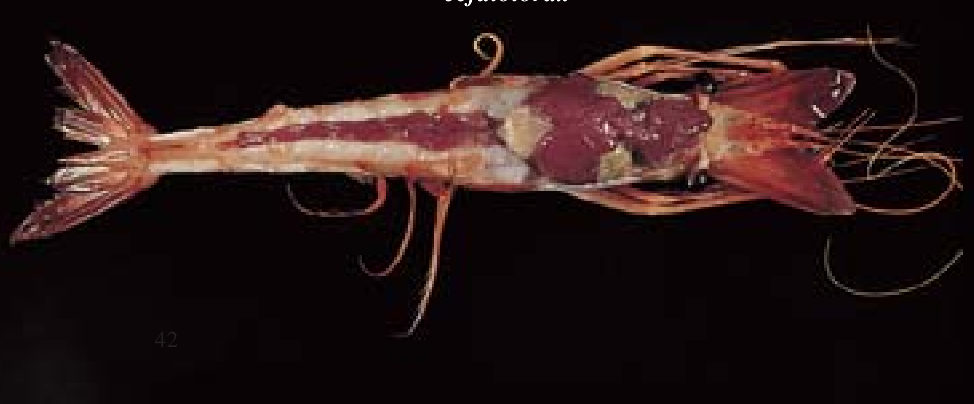


1. La gamba es la especie comercial que se explota a mayor profundidad. Las hembras son mayores que los machos, con un rostro mucho más largo

La gamba presenta un claro dimorfismo sexual evidenciado en los caracteres sexuales secundarios, una vez los individuos han alcanzado la madurez. Las estructuras típicas externas que los distinguen son el thelycum de la hembra y el petasma del macho. El thelycum es una pequeña cavidad que se encuentra en la parte ventral de la zona torácica, donde se ubica el espermatóforo, cápsula segregada por el macho que contiene en su interior los espermatozoides. El petasma, una estructura externa laminar, se forma mediante la unión del primer par de patas nadadoras o pleópodos. Esta lámina facilita al macho la colocación del espermatóforo en el thelycum de la hembra.

El aparato reproductor de las hembras está constituido por dos ovarios paralelos, que se prolongan de la cabeza al telson. Los machos presentan un testículo doble y simétrico, uno a cada lado del cuerpo, en la región torácica. El testículo consta de testis, vaso deferente y ampolla terminal, donde se aloja el espermatóforo. El espermatozoide de gamba tiene una forma peculiar, en champiñón; a diferencia de los espermatozoides del resto de los crustáceos decápodos, no presenta ninguna estructura flagelada que le proporcione movimiento, ni ningún tipo de espícula externa que facilite la penetración del oocito. El proceso de interacción esperma-oocito y la fase posterior de fertilización son todavía un misterio para los investigadores.

2. El proceso de maduración de las gónadas femeninas pasa por un cambio de coloración que va del blanco al violeta oscuro. El período de actividad reproductora de la hembra se extiende de abril-mayo a septiembre-octubre, siendo los meses de junio a agosto los que presentan mayor actividad ovárica. La hembra alcanza la madurez sexual a los 26 mm de cefalotórax

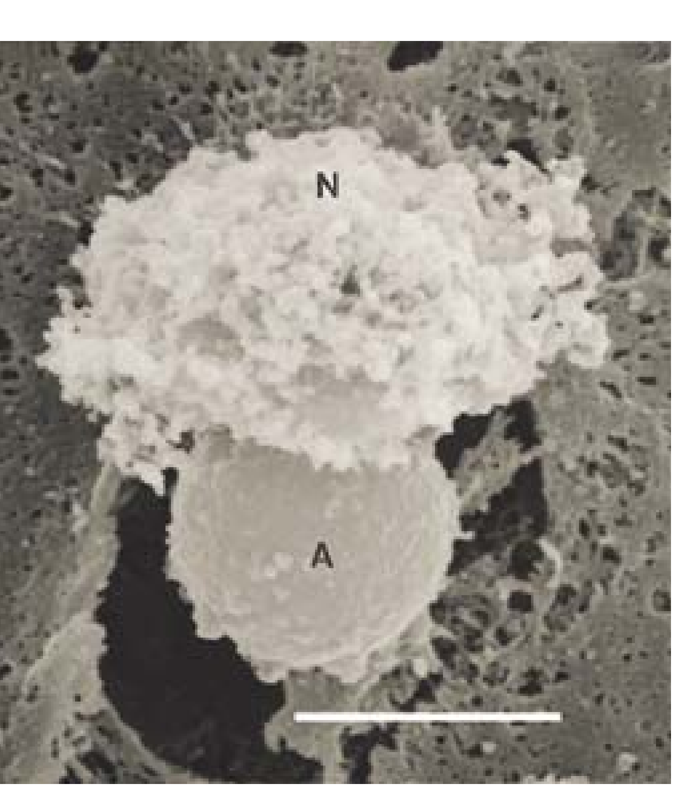




3. En la micrografía electrónica de barrido de la izquierda se muestran las distintas capas del espermatóforo desde la más externa de protección, en la parte superior de la imagen, hasta la más interna, donde se encuentran los espermatozoides



4. Estructuras de anclaje del sistema de unión de los pleópodos para formar el petasma observadas al microscopio electrónico de barrido. Los machos juveniles no tienen todavía el petasma definitivamente unido. Los machos alcanzan la madurez sexual a los 21 mm de cefalotórax; a lo largo de casi todo el año manifiestan actividad gonadal, con máximos entre mayo y septiembre



5. El espermatozoide mide entre 3 y 5 μm. Presenta una estructura constituida por dos cuerpos bien diferenciados, el acrosoma (A)*, región esférica y electrodensa, y el núcleo* (N) *de aspecto fibrilar, poco denso y más voluminoso que el acrosoma. Micrografía de microscopio electrónico de barrido. Escala = 2,5 μm*

6. Micrografía de microscopio electrónico de transmisión en la que se observa un corte longitudinal del espermatozoide, donde se muestra la región citoplasmática (C) *en los laterales de la zona de contacto entre el acrosoma* (A) *y el núcleo* (N)



Anatomía de larga vida

S. Jay Olshansky, Bruce A. Carnes y Robert N. Butler



LA PERSONA DISEÑADA PARA UNA VEJEZ SANA debe poseer las características presentadas en esta figura, además de otras incontables mejoras de diseño tanto externas como internas.

Si los seres humanos hubieran sido construidos para perdurar, tendríamos un aspecto muy diferente. Por dentro y por fuera seríamos muy otros, si la evolución hubiera diseñado el cuerpo humano para funcionar como la seda no sólo en la juventud sino también durante un siglo o más tiempo

Discos herniados, huesos frágiles, caderas fracturadas, ligamentos rotos, venas varicosas, cataratas, sordera, hernias y hemorroides: he aquí la lista de disfunciones corporales, todas demasiado familiares, que nos invaden cuando nuestra edad se alarga. ¿Por qué decaemos precisamente cuando alcanzamos lo que debería ser el mejor momento de la vida?

La máquina de nuestro cuerpo se deteriora porque no ha sido diseñada para durar mucho tiempo y porque la forzamos para que funcione cuando ya se ha cumplido, de largo, su período de garantía. Desde una óptica estética, el cuerpo humano es bello y merecedor de toda la curiosidad y admiración que despierta. Pero, desde la perspectiva del ingeniero, es un engranaje complejo de huesos, músculos, tendones, válvulas y articulaciones, elementos directamente análogos a las frágiles poleas, bombas, palancas y bisagras de las máquinas. Cuando nos adentramos en los años post-reproductivos, nuestras articulaciones y otros elementos anatómicos que nos han servido bien, o no han causado problemas, durante la juventud, ponen de manifiesto sus imperfecciones. Su deterioro u otras circunstancias contribuyen a los problemas de salud que son frecuentes en los últimos años de la vida.

Desde el punto de vista de la evolución, albergamos errores debidos a que la selección natural —esa fuerza que ha moldeado nuestras características distintivas, genéticamente controladas— no tiene como objetivo la perfección o un estado de salud perdurable. Si un diseño para la construcción de un cuerpo permite a los individuos sobrevivir lo suficiente para reproducirse —y en los seres humanos y en otros organismos, para criar a sus hijos— ese diseño será seleccionado. Es decir, los individuos con vigor suficiente para reproducirse, pasarán sus genes —y por lo tanto el diseño de su cuerpo— a la siguiente generación. En un proceso de selección negativa, se eliminarán los diseños que dificultan gravemente la supervivencia en los años jóvenes, pues la mayoría de los individuos afectados morirán antes de haber tenido una oportunidad para generar descendencia. Y lo que reviste todavía mayor interés, las peculiaridades anatómicas y fisiológicas que solamente son incapacitantes después del período reproductivo, se extenderán. Por ejemplo, si el diseño de un cuerpo conduce a un colapso total a la edad de 50 años pero no impide la reproducción del individuo, este diseño seguirá adelante a pesar de unas lesivas consecuencias que aparecen tardíamente en la vida del individuo.

Si hubiéramos sido construidos para durar largo tiempo, adoleceríamos de bastantes menos de esos errores que convierten en miserables nuestros últimos días. Pero la evolución no funciona así. Antes bien, combina elementos nuevos con otros preexistentes.

La postura erecta de los seres humanos es un ejemplo. Ha sido el resultado de la adaptación del plan de organización de los mamíferos cuadrúpedos. Esa modificación fue, sin duda, de gran ayuda a los primeros homínidos: se admite que la postura erecta estimuló el uso de instrumentos y desarrolló la inteligencia. Nuestra columna vertebral se halla adaptada en parte a este inconfortable cambio: se han reforzado las vértebras inferiores para contrarrestar el incremento de la presión vertical, y la columna se ha curvado un poco para evitar caer hacia delante. Pero estos arreglos no han evitando una serie de problemas secundarios a la postura erecta.

¿Qué hubiera pasado si...?

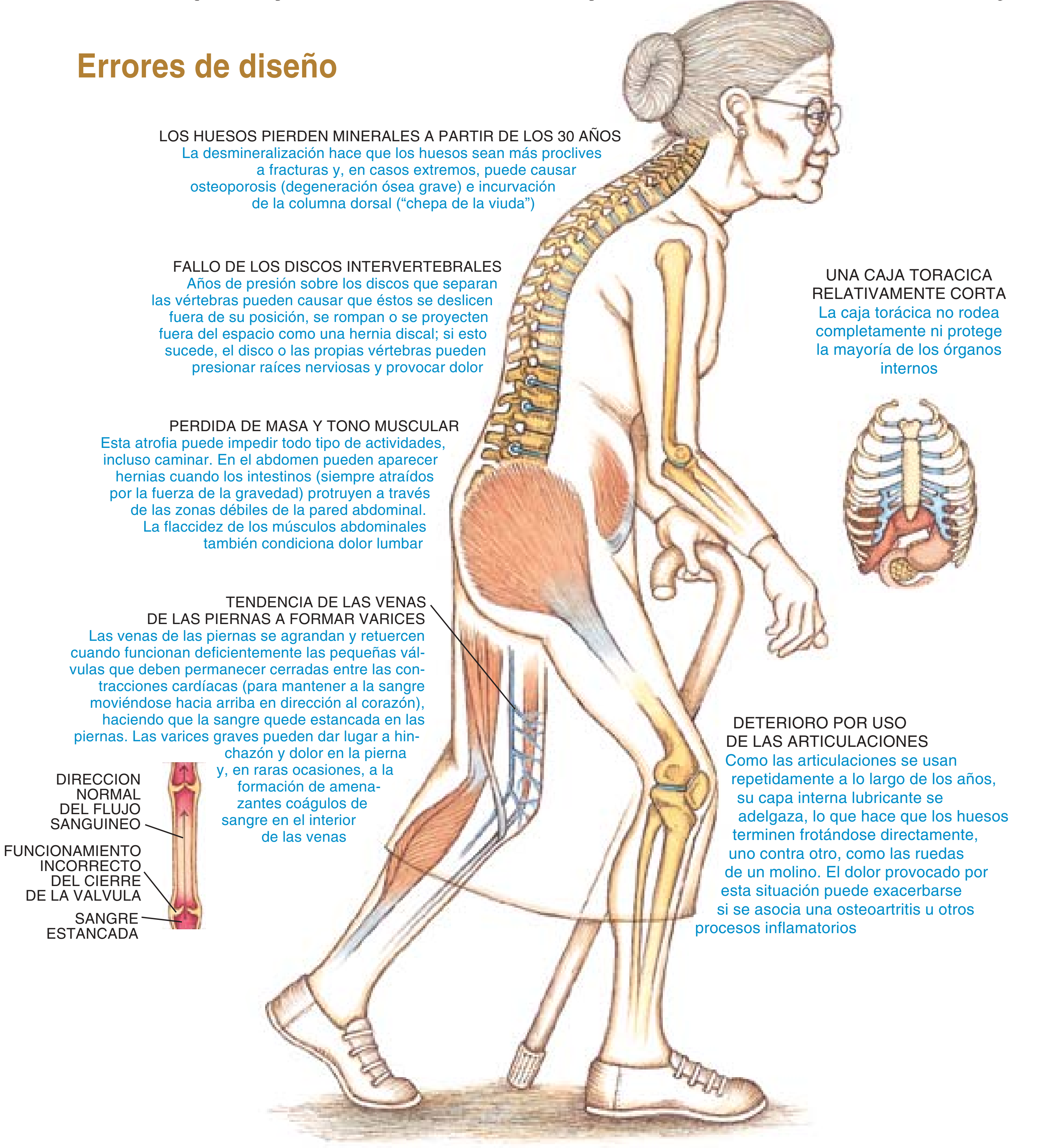
Recientemente, los tres autores de este trabajo hemos comenzado a considerar cómo sería el cuerpo humano de habérsele diseñado para una vida mucho más larga y sana. Las revisiones anatómicas representadas en las páginas siguientes son imaginarias e incompletas. Sin embargo, las presentamos para llamar la atención sobre una cuestión importante. Se describe a menudo el envejecimiento como una enfermedad a la que se puede dar marcha atrás o eliminar. Muchos de los que ofrecen el elixir de la juventud quieren hacernos creer que los problemas médicos asociados con el envejecimiento son culpa nuestra, debidos a nuestros decadentes estilos de vida. Es verdad que cualquier loco puede acortar su vida. Pero es tremendamente injusto acusar a la gente de las consecuencias para su salud que derivan de la herencia de un cuerpo, un cuerpo que no dispone de perfectos sistemas de mantenimiento y de reparación, ni fue construido para usarlo largo tiempo o para una salud perpetua. Nos deterioramos con el tiempo, aun cuando pudiéramos descubrir y adoptar algún mítico estilo de vida ideal.

Esta realidad significa que envejecer, y la mayoría de sus trastornos asociados, no son ni antinaturales ni evitables. Ninguna simple intervención puede maquillar las incontables imperfecciones que se extienden por nuestra anatomía y que se revelan con el paso de los años. Tenemos confianza, sin embargo, en que la ciencia biomédica sea capaz de aliviar algunas de las enfermedades secundarias a este proceso. Los investigadores están identificando con rapidez miles de genes —al tiempo que averiguan su función—, desarrollando fármacos para controlarlos y aprendiendo a domeñar y potenciar las extraordinarias capacidades de reparación que existen en nuestro organismo. Estos profundos avances podrían, en el futuro, ayudar a compensar muchos de los fallos de diseño que arrastramos.

ASI CAMINAMOS

Numerosos trastornos incapacitantes e incluso fatales del envejecimiento derivan, en parte, de la locomoción bípeda y de la postura erecta; por paradójico que resulte, las mismas características que han capacitado a la especie humana para florecer como tal. Cada paso que damos proyecta una presión extraordinaria sobre nuestros pies, tobillos, rodillas y columna vertebral, estructuras que soportan el peso de la totalidad del cuerpo situado por encima de ellas. Durante el transcurso de un solo día, los discos intervertebrales de la región lumbar son sometidos a presiones equivalentes a toneladas por centímetro cuadrado. A lo largo

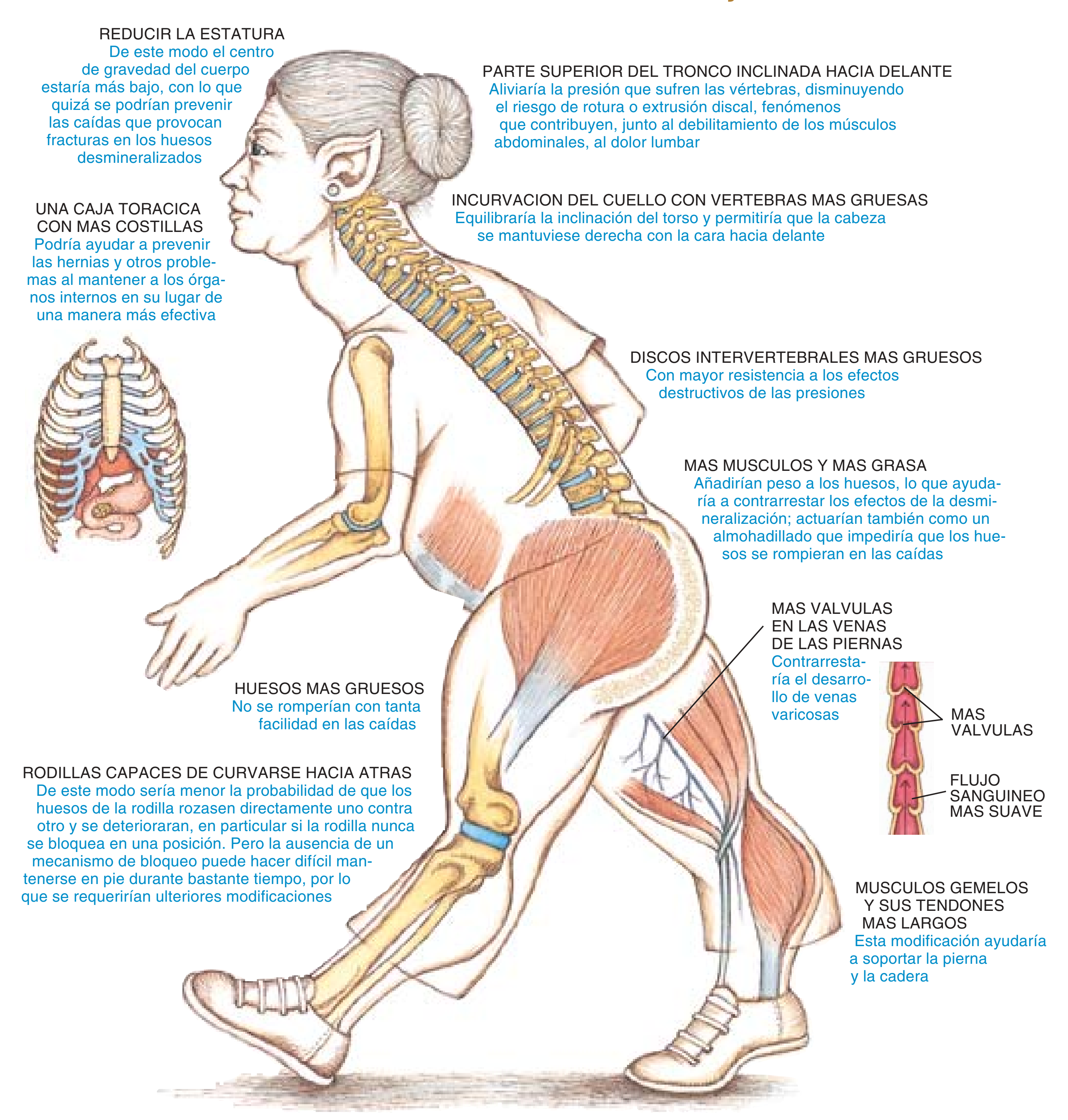
Errores de diseño



de la vida, el soportar tanta presión tiene un precio, como lo tiene el repetido uso de nuestras articulaciones y la acción constante que ejerce la fuerza de la gravedad sobre nuestros tejidos.

Aunque la gravedad tiende a hacernos caer, disponemos de mecanismos que la contrarrestan. Por ejemplo, una intrincada red de tendones nos ayuda a sujetar nuestros órganos a la columna vertebral, evitando que caigan y se aplasten unos contra otros. Pero estos dispositivos anatómicos —como el cuerpo en general— nunca fueron pensados para trabajar eternamente. Si el objetivo fundamental de la evolución hubiera sido la longevidad y una persistente buena salud, se hubiese generalizado las modificaciones que diseñamos en estas páginas.

Mejoras en el diseño



UN DISEÑO PARA LA CABEZA

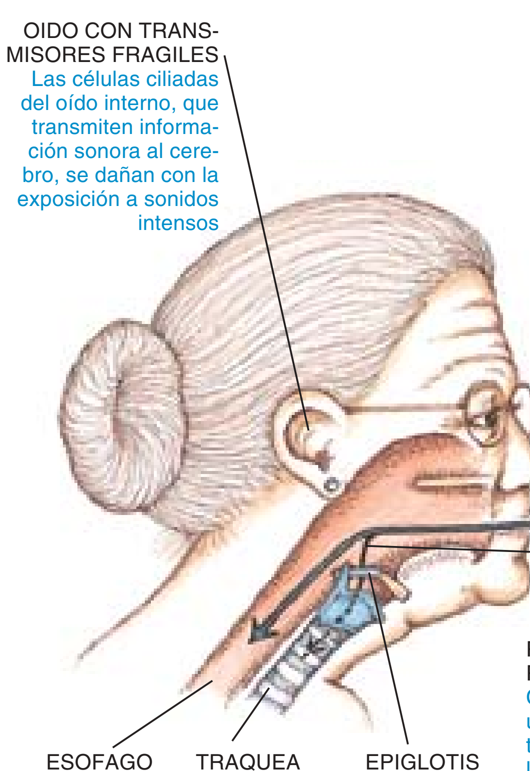
Varias partes de la cabeza y del cuello se convierten habitualmente en problemáticas por las molestias que ocasionan en la vejez. Consideremos lo que sucede en el ojo. En su versión humana constituye una proeza de la evolución, pero su complejidad da pie a numerosos contratiempos en una vida larga.

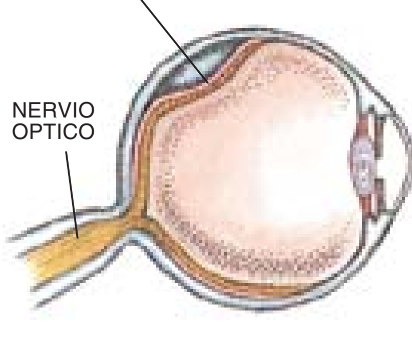
Nuestra visión disminuye a medida que el líquido protector de la córnea se hace menos transparente con el tiempo. Los músculos que controlan la apertura del iris y el enfoque del cristalino se atrofian y pierden capacidad de respuesta. El cristalino se engruesa y se torna amarillento, mermando la agudeza visual y la percepción de los colores. Además, la retina —responsable de transmitir las imágenes al cerebro— puede desprenderse con facilidad de la cara posterior del ojo, dando lugar a una ceguera.

Muchos de tales problemas serían difíciles de evitar con otro diseño, aunque el ojo del calamar sugiere que otra disposición habría reducido la posibilidad del desprendimiento de retina. Unos cuantos retoques anatómicos podrían haber preservado la audición en los ancianos.

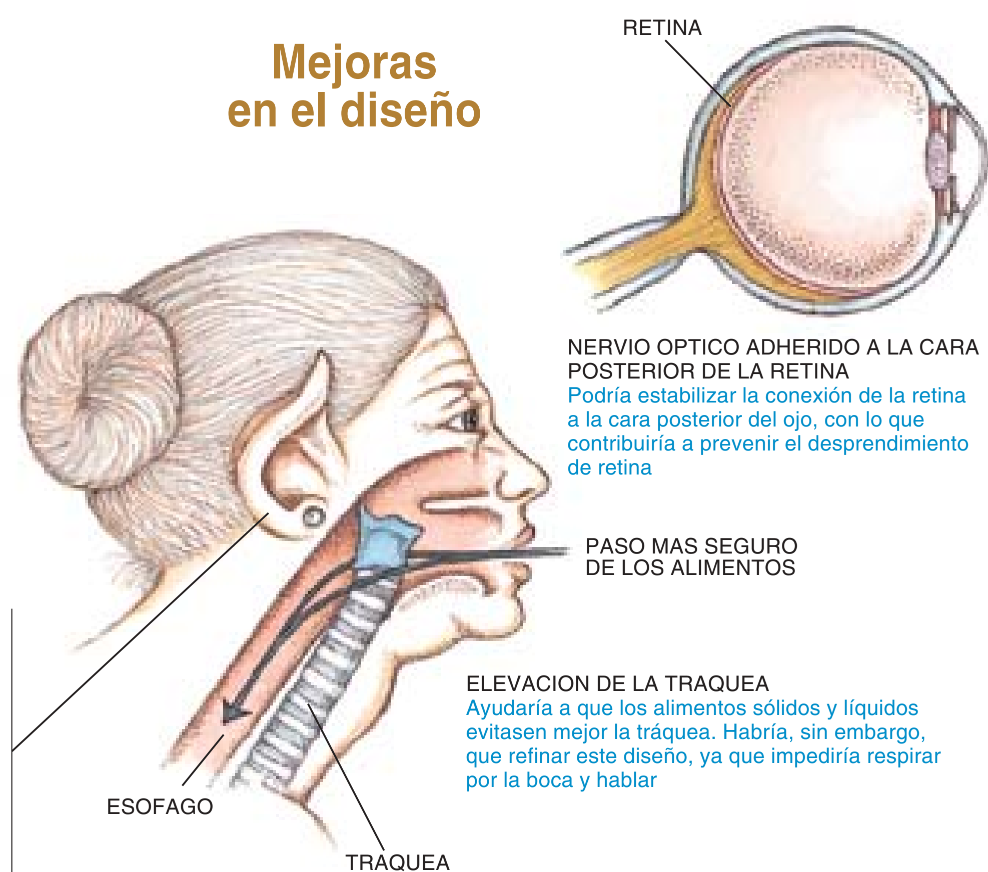
Un diseño subóptimo de los segmentos superiores del aparato respiratorio y del aparato digestivo hace de la sofocación un riesgo para los ancianos. Con un simple arreglo habríase resuelto el problema, aunque a costa de importantes concesiones, calculando coste y beneficio.

Errores de diseño





Mejoras en el diseño

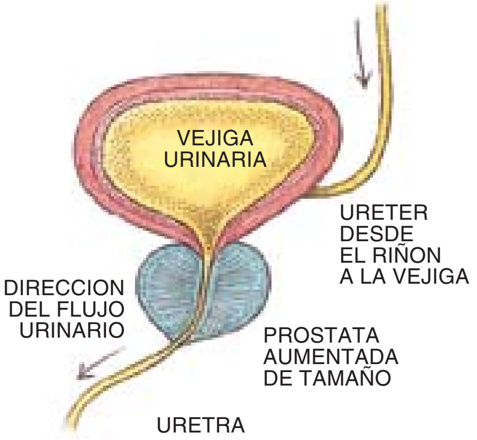


CONSULTE CON EL FONTANERO

Si un fontanero experimentado contemplara la anatomía de la próstata en el hombre pensaría que es el trabajo de un aprendiz, ya que la uretra, el tubo que sale de la vejiga urinaria, pasa directamente a través de la masa de la glándula. Esta disposición puede tener beneficios desconocidos, aunque de hecho provoca problemas urinarios; entre ellos, un débil flujo urinario y una frecuente necesidad de orinar.

Las mujeres también se enfrentan con problemas de fontanería cuando envejecen, especialmente incontinencia urinaria. Ambos sexos podrían haberse ahorrado bastantes molestias si la evolución hubiese llevado a cabo unas sencillas modificaciones en su diseño anatómico.

PROSTATA
vista lateral



Errores de diseño

URETRA PROPICIA A LA OBSTRUCCION

La próstata aumenta de tamaño en uno de cada dos varones en algún momento de su vida. Cuando crece, comprime la uretra, obstruyendo potencialmente el flujo de la orina. La obstrucción total puede ser fatal

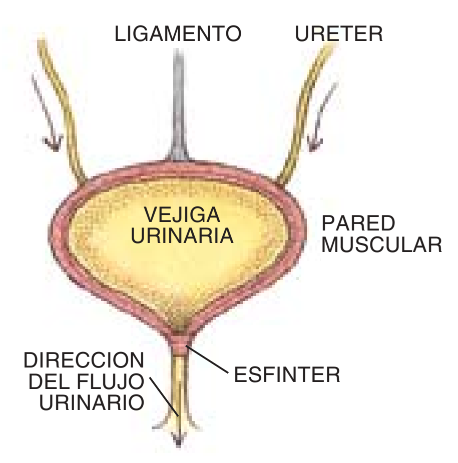
Mejoras en el diseño

URETRA RECOSTADA SOBRE LA PROSTATA

La uretra no se comprimiría si la próstara aumentara de tamaño



VEJIGA EN LA MUJER
vista de frente



Errores de diseño

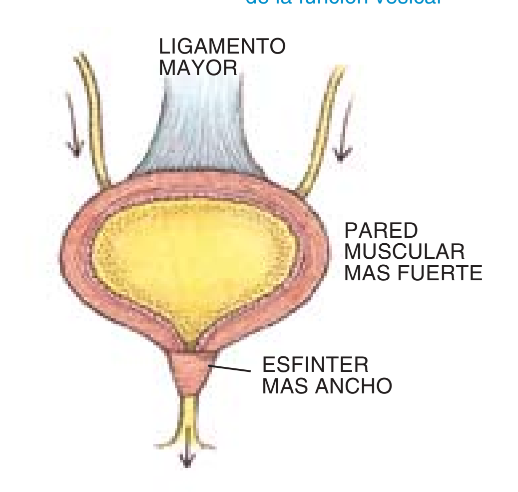
MUSCULOS Y LIGAMENTOS QUE SE DEBILITAN CON EL TIEMPO

Especialmente después de múltiples embarazos, los músculos del suelo de la pelvis y la vejiga, y los ligamentos que soportan la vejiga, pueden distenderse y caer, provocando la incontinencia

Mejoras en el diseño

ESFINTER VESICAL MAS FUERTE EN LA VEJIGA Y LIGAMENTOS MAS DURADEROS

Se incrementaría el control de la función vesical



LOS AUTORES

S. JAY OLSHANSKY, BRUCE A. CARNES y ROBERT N. BUTLER mantienen un persistente interés en los procesos que conducen al envejecimiento humano. Olshansky es profesor de la Universidad de Illinois en Chicago. Con Carnes investiga la biodemografía del envejecimiento. Son coautores de *The Quest for Immortality: Science at the Frontiers of Aging*. Butler es presidente del Centro Internacional sobre Longevidad en Nueva York.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ON GROWTH AND FORM. D'Arcy Wentworth Thompson. Edición ampliada, 1942. Reimpresión de Dover Publications, 1992.

THE PANDA'S THUMB: MORE REFLECTIONS IN NATURAL HISTORY. Stephen Jay Gould. W. W. Norton, 1980.

THE BLIND WATCHMAKER: WHY THE EVIDENCE OF EVOLUTION REVEALS A UNIVERSE WITHOUT DESIGN. Richard Dawkins. W. W. Norton, 1986.

THE SCARS OF EVOLUTION: WHAT OUR BODIES TELL US ABOUT HUMAN ORIGINS. Elain Morgan. Souvenir Press, 1990. Reimpresión de Oxford University Press, 1994.

WHY WE GET SICK: THE NEW SCIENCE OF DARWINIAN MEDICINE. Randolph M. Nesse y George C. Williams. Random House, 1994.

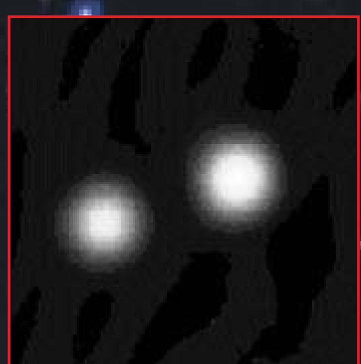
Interferometría





Con el advenimiento de una nueva generación de interferómetros ópticos los astrónomos abordan el estudio de las estrellas con un poder resolutivo 100 veces superior al que se alcanza mediante el Telescopio Espacial Hubble

estelar

1. EL PRIMER SISTEMA DE ESTRELLAS BINARIAS del que se tomaron imágenes con un telescopio fue Mizar, la estrella central del asa de La Cuchara (Osa Mayor). Aunque las dos componentes de Mizar (Mizar A y Mizar B) están separadas menos de 0,004 grados en el firmamento, cada una de ellas es, a su vez, una estrella binaria. En 1996 el Interferómetro Óptico Prototípico de la Armada (NPOI) resolvió las dos estrellas que forman Mizar A al construir la imagen de mayor resolución espacial jamás obtenida en astronomía óptica. Las cuatro imágenes muestran a Mizar Aa y Mizar Ab recorriendo la mitad de la órbita alrededor de su centro común de gravedad.

Arsen R. Hajian y J. Thomas Armstrong

Cierta noche de hace unos 20 años uno de los autores tomó los prismáticos de su padre dormido y salió de puntillas. El futuro astrónomo había decidido buscar compañeros de juegos en otros planetas alrededor de estrellas. Para su desesperación, los prismáticos no le reportaron ninguna ventaja. A simple vista, las estrellas eran puntos de luz titilantes; con los prismáticos, también. Aunque las mayores estrellas podrían abarcar el sistema solar entero en sus tamaños luminosos, todas, salvo el Sol, distan tanto, que no pueden resolverse con los prismáticos.

Veinte años después, aquel niño percibe ahora no sólo el punto de luz, sino también el disco circular, al menos de algunas de las más brillantes. Semejante resolución estelar se funda en una técnica sugerida hace más de un siglo: la interferometría. En vez de mirar a través de los prismáticos o incluso a través del telescopio común, se utiliza un ordenador conectado a un interferómetro óptico. Durante más de medio siglo, la interferometría en longitudes de onda radio conoció un éxito espectacular, cartografiando las estructuras de galaxias lejanas y de los cuásares por medio de sus emisiones radio. Sin embargo, en los últimos 15 años la técnica se ha abierto a la interferometría en el infrarrojo y en el visible, con unos resultados que han merecido la espera. El Telescopio Espacial Hubble es el "rey" supremo en la toma de imágenes de calidad de los objetos más débiles, pero la interferometría óptica desde la Tierra puede ver, en el caso de las estrellas más brillantes, detalles de finura 100 veces superior.

La interferometría óptica progresa. Ha pasado de experimentos más o menos difíciles realizados en laboratorios a convertirse en la técnica observacional de moda. Los interferómetros en funcionamiento toman ya imágenes de las superficies estelares, de sistemas múltiples de estrellas, de nubes o discos de materia alrededor de las estrellas y de las sombras de los planetas en su curso por delante de las estrellas. En poco tiempo, los astrónomos dispondrán de un gran número de imágenes nuevas, con películas espectaculares de la rotación de las estrellas donde aparezcan manchas estelares, el equivalente a las manchas del Sol. Y conoceremos mejor el nacimiento, estructura, actividad, evolución y muerte de las estrellas.

La naturaleza de la interferometría estriba en la combinación de dos señales casi idénticas para producir una interferencia y, por tanto, obtener información que no ofrece una señal sola. Al superponer la luz procedente de dos telescopios separados, se produce un modelo de luz y bandas oscuras. El espaciado entre esas bandas y su pauta de variación, cuando los telescopios se mueven, proporcionan al astrónomo información sobre la estructura de la fuente lumi-

Aportaciones a la astronomía

La interferometría óptica ha dejado de ser mera curiosidad técnica. Con la veintena larga de interferómetros existentes se han cosechado abundantes resultados científicos en astronomía, entre los que se destacan:

Estrellas solitarias: diámetros estelares

Las primeras mediciones de diámetros estelares fueron realizadas en 1920 por Albert A. Michelson y Francis G. Pease, quienes cifraron el diámetro de Betelgeuse y de otras cinco estrellas supergigantes en valores de 20 a 50 milisegundos de arco. Si el ojo humano tuviera este poder de resolución, veríamos los átomos que forman nuestra mano a la distancia de un brazo. Apenas un siglo después, el equipo de Robert Hanbury Brown, con el Interferómetro de Intensidad de Australia, midió 32 estrellas brillantes y halló diámetros de 0,4 a 5,5 milisegundos de arco. Se han medido ya los diámetros de más de 100 estrellas, en algunos casos con precisiones del 1 %. Algunas, pocas, se han estudiado con otras técnicas; por ejemplo, la de su análisis cuando la Luna pasa por delante de las mismas.

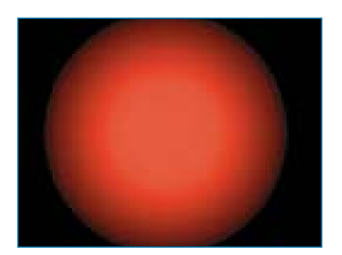


Imagen reciente de Betelgeuse

Estrellas múltiples: órbitas

La mitad de las estrellas del firmamento, por lo menos, constan de dos o más estrellas que giran alrededor de un centro común de gravedad. Para determinar las masas de las estrellas hemos de observar las órbitas de los sistemas estelares dobles o múltiples.

En 1920, John S. Anderson, del Observatorio de Monte Wilson, observó la estrella binaria Capella con el interferómetro de 6 metros de Michelson, y determinó la separación aparente entre las dos componentes estelares a lo largo de 6 posiciones distintas de la órbita. Para entonces, Capella era ya una estrella familiar, por tratarse de una binaria espectroscópica; ello significa que la velocidad de las dos estrellas en su órbita mutua se había medido a través de los corrimientos Doppler de sus espectros. Anderson combinó sus resultados con las observaciones espectroscópicas para obtener la inclinación de la órbita (relativa a nuestra línea de visión) y, por tanto, determinar las masas de las dos estrellas y la distancia al sistema.

Los interferómetros modernos han continuado midiendo las órbitas de las estrellas binarias con mayor precisión y mejor resolución. La separación más pequeña entre dos estrellas determinada hasta la fecha es de 2 milisegundos de arco para la estrella TZ Trianguli, trabajo realizado por Christopher D. Koresko y su equipo con el Interferómetro de Prueba del Monte Palomar. Hoy día la interferometría óptica es tan precisa, que son los datos espectroscópicos los que a menudo limitan nuestro conocimiento de las masas de las estrellas.

Estructura de la superficie estelar

Más difícil incluso que medir los diámetros de las estrellas resulta detectar las estructuras de la superficie estelar en las imágenes. La tarea requiere no sólo una mejor resolución, sino también una gran sensibilidad, puesto que las estructuras de la superficie suelen comportar variaciones relativamente pequeñas de la intensidad. Un ejemplo sencillo de esas estructuras lo tenemos en el oscurecimiento hacia el borde: cuando el borde del disco estelar no brilla tanto como el centro. Si miramos hacia el centro de la estrella, percibiremos capas más profundas de la atmósfera estelar, donde el gas es más caliente y brillante. La luz del borde, por contra, proviene de gas más frío y tenue. Los astrónomos observan el oscurecimiento hacia el borde del Sol, efecto que debería darse también en todas las estrellas, de acuerdo con su tipo espectral. La interferometría óptica actual distingue entre un disco uniforme y otro que esté afectado del oscurecimiento hacia el borde. Este tipo de estudios son necesarios para someter a prueba nuestras teorías de las atmósferas estelares.



El Sol

nosa con una resolución mayor que la que se obtendría utilizando las imágenes de un solo telescopio. A ese método de cartografía de la estructura espacial del objeto se le denomina interferometría espacial. Otros tipos de interferometría pueden determinar el espectro de luz y otras propiedades de la fuente.

La interferometría espacial en el óptico, una empresa arriesgada, necesita de equipo informático de última generación. Describiremos aquí su mecanismo de operación, los pasos seguidos hasta la maduración, la función que cumple y sus posibilidades de futuro.

Ingeniería y la atmósfera

Cuando un astrónomo se propone obtener imágenes detalladas de una estrella, debe hacer frente a dos problemas: los límites del tamaño del telescopio y la turbulencia causada por la atmósfera terrestre. Empecemos por una de las cuestiones básicas: ¿cuál es el tamaño aparente de una estrella (es decir, el tamaño del disco que dibuja en el firmamento)?

A distancias muy cercanas de la Tierra, el planeta Venus en fase creciente subtiende un minuto de arco, un sexagésimo de grado. Un ojo humano agudísimo podría distinguir el disco de Venus con un diámetro de un minuto de arco; es decir, vería que se trata realmente de un disco y no de un punto. Un telescopio con un espejo de 15 cm lo percibiría 60 veces mejor que el ojo, por la sencilla razón de que su apertura es casi el mismo número de veces mayor que nuestra pupila. En ese telescopio, la estrella aparecería como un disco borroso de casi un segundo de arco de diámetro, ya que el telescopio no puede formar imágenes menores. La "borrosidad" se debería a la difracción de la luz al pasar por la apertura; a menor apertura, mayor la imagen producida.

Un segundo de arco es el tamaño de una mosca en el centro de un estadio de fútbol vista desde la grada, más o menos el tamaño de una de las lunas mayores de Júpiter vista desde la Tierra. Pero Betelgeuse, la estrella que forma el mayor disco en el firmamento terrestre (aparte del Sol), alcanza la quinceava parte de ese tamaño, es decir, tiene un diámetro de unos 0,06 segundos de arco (60 milisegundos). La mayoría de las estrellas visibles al ojo humano tienen tamaños de milisegundos, e incluso menos.

2. EL INTERFEROMETRO MARK III de Monte Wilson, en California, compendia los elementos básicos que contiene un prototipo de los empleados en astronomía. Dos espejos siderostatos bien separados siguen a la estrella mientras la Tierra gira; dirigen la luz estelar (*amarillo y azul*) hacia una serie de espejos. Los espejos de corrección ajustan la oscilación causada por las turbulencias atmosféricas. Las líneas de retardo compensan el retraso geométrico para que cada haz de luz que salió de la estrella llegue, al mismo tiempo y simultáneamente, al divisor de haz. Combina éste los dos haces (*rojo*). Los detectores miden las franjas de interferencia resultantes.

El poder resolutivo de un telescopio —esto es, su capacidad para distinguir imágenes pequeñas— mejora en proporción a su apertura. Se han de utilizar, pues, telescopios grandes. Si un telescopio de 15 cm puede resolver discos del tamaño de un segundo de arco, otro de 2,5 metros debería poder resolver Betelgeuse; uno de los telescopios Keck de 10 metros de Mauna Kea, Hawai, tendría que proporcionar los detalles de su atmósfera, además de resolver otras estrellas brillantes del firmamento. Ahora bien, en la práctica un aumento del tamaño del telescopio más allá de los 15 cm no supone ninguna ventaja mientras no se trate el problema de las turbulencias atmosféricas.

La situación recuerda el intento frustrado de leer o escribir en el fondo de una piscina con el oleaje levantado por un viento fuerte: los

bucles turbulentos de la superficie distorsionan las ondas de luz procedente del fondo. Al observar la luz de las estrellas a través de la atmósfera terrestre estamos realizando un ejercicio similar.

La luz se propaga en forma de onda. En el espacio allende la atmósfera, las ondas de luz procedentes de una estrella llegan como una serie de planos paralelos, como hojas nuevas de papel. Las turbulencias irregulares de la atmósfera distorsionan cada onda a medida que ésta viaja hacia el telescopio, asimilándola a una hoja de papel que alguien arrugó y luego intentó alisar de nuevo.

Los efectos de las arrugas en la imagen final resultan ser esencialmente los mismos que si la onda distorsionada estuviera formada por distintas secciones, cada sección inclinada con respecto a la otra en ángulos diferentes. Para la luz en longitudes de onda del visible, estas secciones miden de cinco a 20 cm de extensión, según el viento y el tiempo atmosférico, por lo que el segmento de una onda que llega a un telescopio de 10 metros consta de miles de tales secciones. Las secciones con la misma inclinación se juntan para producir una imagen de la estrella —una "mancha"— que estará desviada de su posición teórica según su ángulo de inclinación. El resultado final es un conjunto de manchas que se mueven muy rápido a medida que la atmósfera cambia sin cesar. A menos que el tiempo de exposición sea muy inferior al segundo, la imagen de la estrella será un disco difuso que, incluso en buenas condiciones, no resultará menor que el que proporcionaría un telescopio de 15 cm.

La interferometría de manchas aborda las turbulencias atmosféricas sirviéndose de un telescopio común y tiempos de integración de unos 0,01 segundos, congelando de esta forma el movimiento de las manchas. Esta técnica ha evidenciado su eficacia en la medición de las órbitas de las estrellas binarias, si bien la obtención de imágenes ha entrañado una dificultad mucho mayor de lo que de esta técnica se esperaba en un principio.

En el método de la óptica adaptativa, los sensores miden la distorsión de la onda entrante y, para contra-

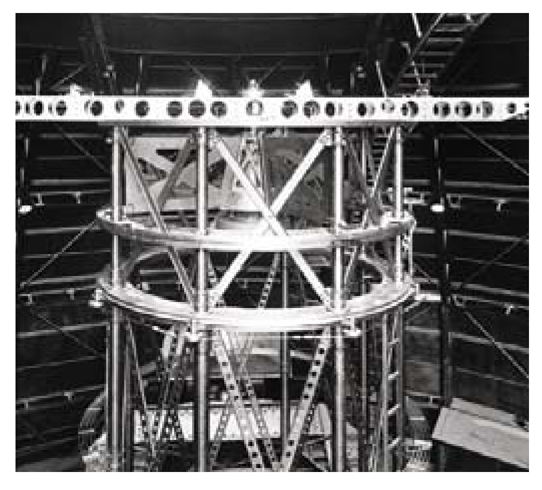
Los interferómetros en astronomía: repaso histórico

1868: El físico francés Armand-Hippolyte-Louis Fizeau sugiere tapar la apertura de un telescopio con fines interferométricos. Propone medir el tamaño de las estrellas colocando una máscara con dos agujeros en un telescopio y analizando el modelo de interferencias resultante.

1876: Édouard Stephan aplica la técnica de Fizeau con un telescopio de 80 cm en Marsella. Pero la separación de 65 cm entre los agujeros que utiliza resulta suficiente para medir los tamaños de las estrellas. Cuando Stephan observó la estrella a través del ocular, sólo vio la imagen procedente de cada apertura de la máscara. Estas imágenes, grandes, suelen traslaparse. La región de superposición presenta una serie de tiras oscuras (las franjas de interferencia). Para medir el diámetro estelar, hemos de aumentar la separación entre las aperturas hasta que desaparezcan las franjas. A mayor separación requerida, menor tamaño de la estrella. Pero Stephan agotó las posibilidades del telescopio antes de que la separación entre las aperturas fuera suficiente. Concluyó que las estrellas que observó eran todas inferiores a 0,16 segundos de arco.

1891: Albert A. Michelson, por lo que parece sin conocer el trabajo de Fizeau y Stephan, aplica la misma técnica a la contemplación de los satélites galileanos de Júpiter. Acierta a medir sus tamaños ya que, con diámetros de 1 y 2 segundos de arco, estas lunas son bastante mayores que las estrellas.

1920: Michelson mide las estrellas instalando un haz metálico de seis metros dotado de espejos en cada extremo a lo largo de la apertura del telescopio Hooker de 2,5 metros, de Monte Wilson, en aquel entonces el mayor telescopio del mundo (*figura de abajo*). En 1930, Francis G. Pease, colaborador de Michelson, intenta la interferometría con espejos separados por una montura de 15 metros; fracasa debido probablemente a que la montura no gozaba de rigidez suficiente desde el punto de vista mecánico.



El interferómetro de Michelson en 1920

1950-1970: Se realizan numerosos avances en la interferometría astronómica con ondas radio. La interferometría en radio es bastante más fácil que la óptica. Merced a su longitud de onda, miles de veces mayor, se reduce el efecto de la atmósfera terrestre y se facilita la precisión de ingeniería para realizar la interferencia. Otros avances importantes incluyen la amplificación de la señal radio y la capacidad de guardar los datos en cada telescopio para su combinación posterior.

1958-1976: Robert Hanbury Brown, Richard Q. Twiss y sus colaboradores dan dos pasos importantes con su construcción del Interferómetro de Intensidad cerca de Narrabri, Australia. Primero, rompen con la barrera de las aperturas; no colocan los espejos a lo largo de un telescopio central, sino que utilizan dos telescopios separados. Cada telescopio, de 6,5 metros, puede distanciarse de 10 a 188 metros, un récord todavía no superado. Segundo, utilizan la detección electrónica y guardan los datos; hasta entonces, los investigadores observaban a simple vista.

Brown y Twiss se sirven también de una técnica novedosa: detectan los fotones individuales de cada telescopio y correlacionan el tiempo de su llegada. Esta técnica tiene la virtud de la simplicidad (los haces de luz de los telescopios nunca terminan de combinarse), aunque presenta una sensibilidad más baja. Incluso dedicando 100 horas a la

pesar esa distorsión lo máximo posible, un ordenador deforma el espejo del telescopio. Se ha de ajustar sin cesar, a escalas de tiempo de milisegundos, el espejo deformable. Se trata de una técnica que está revolucionando los grandes telescopios; proporciona imágenes muy definidas con resoluciones angulares próximas al límite teórico dado por la apertura del telescopio [*véase* "Optica adaptativa", por John W. Hardy; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1994].

Pese a todo, no logra distinguir el tamaño de la mayoría de las estrellas. Incluso después de haber eliminado todos los efectos de la atmósfera, un telescopio de 10 metros sólo podría resolver discos de escasas docenas de estrellas, a saber, las que superaran unos 10 milisegundos de arco. Para medir el diámetro de las estrellas perceptibles a simple vista, por ejemplo, se necesitaría un telescopio de 500 metros de diámetro. Pero la construcción de semejante espejo, dotado de la precisión requerida (una fracción de micra) y sujeto sin distorsiones extras para dirigirlo hacia ciertas estrellas, trasciende las posibilidades ingenieriles de un futuro próximo.

Pero resulta que no se requiere un espejo de 500 metros. La virtud de la interferometría consiste en colocar dos telescopios bastante menores de 500 metros separados por una determinada distancia, en corregir los movimientos de la imagen originados por la atmósfera y en combinar la luz en una posición central.

Así opera la interferometría

Imaginemos tres instrumentos: un telescopio reflector clásico, otro telescopio idéntico aunque con todos los segmentos de su espejo primario tapados excepto dos de ellos (el telescopio será, pues, de una apertura efectiva menor) y un interferómetro, que consta de dos espejos primarios pequeños y de un sistema que hace converger la luz en un detector. Cada instrumento recoge luz y la conduce, en sincronía pero de una forma diferente, hacia su detector.

En el telescopio clásico, la curvatura de su único espejo, grande, asegura que todos los segmentos de la onda de luz de la estrella alcancen el foco al mismo tiempo. (De hecho, esa llegada simultánea

observación, sólo pueden estudiarse estrellas que no sean más débiles que las del cinturón de Orión, es decir, cuyo brillo se halle en torno a la magnitud 2,5 en términos técnicos.

1974: Dos grupos de investigadores utilizan el método de telescopios separados y emplean técnicas de mayor capacidad de detección. El encabezado por Antoine Labeyrie trabaja en longitudes de onda del visible y utiliza la técnica de Michelson de combinar los dos haces de luz antes de la detección final; observa así la estrella Vega con una línea de base de 12 metros. En Kitt Peak, Arizona, el grupo liderado por Charles H. Townes opera en el infrarrojo medio y toma prestada la técnica de radioastronomía para observar el planeta Mercurio con una línea de base de 5,5 metros. Conocido como "detector heterodino", el método consiste en convertir la señal de altas frecuencias en bajas frecuencias de una forma muy similar a como los receptores radio convierten las señales FM de 100 megahertz en frecuencias de sonido dentro del rango auditivo humano.

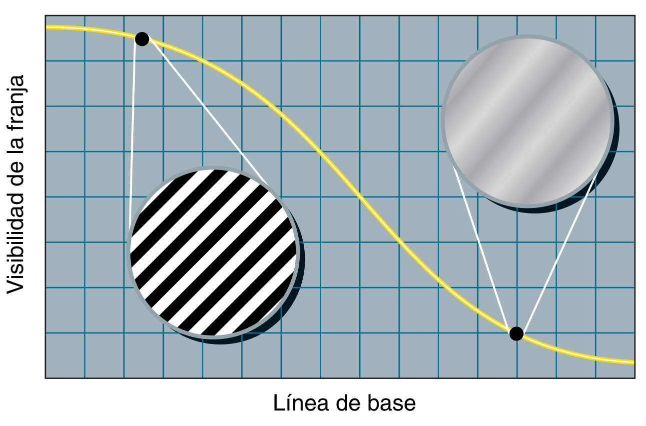


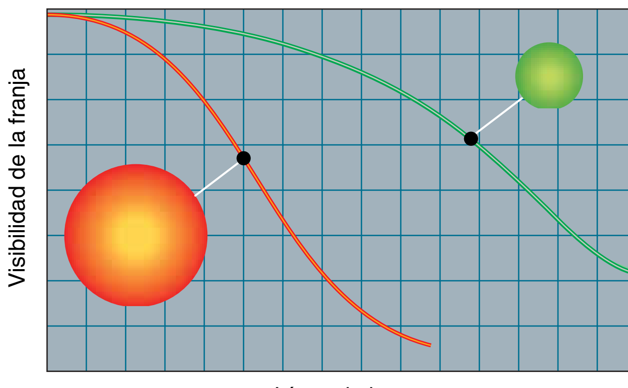
Interferómetro Optico Prototípico de la Armada en Anderson Mesa, Arizona

1980: Se ensaya en Socorro, Nuevo México, el Radiointerferómetro de Gran Distribución ("Very Large Array"). Prosigue en su cosecha de resultados científicos importantes.

Trabajo actual en el óptico: Siguiendo el trabajo de Labeyrie y Townes, la actividad dentro de la interferometría óptica se ha acelerado. Townes continúa con el desarrollo en el infrarrojo medio que comenzó a principio de los años setenta. Su grupo opera ahora el interferómetro de dos detectores heterodinos con telescopios de 1,6 metros sobre una línea de base máxima de 32 metros. Han estudiado el polvo que rodea a las estrellas a lo largo de su ciclo de vida. Un tercer telescopio adicional y una línea de base de 75 metros se instalarán en un futuro próximo.

Desde 1974 los astrónomos han construido más de una docena de interferómetros que operan en el óptico y en el infrarrojo cercano. De ellos, ocho están en funcionamiento y cinco se hallan en fase de desarrollo. Constituyen todos una extensión, en varios sentidos, de la arquitectura empleada por Labeyrie: longitud de la línea de base (la máxima hoy día es de 80 metros del Interferómetro Estelar, de la Universidad de Sydney), tamaño de las aperturas (1,5 metros, GI2T, Francia), número de telescopios utilizados simultáneamente (cuatro, la red Distribución en Síntesis de Apertura Optica de Cambridge) y cobertura en longitud de onda (450 a 850 nanómetros, Interferómetro Optico Prototípico de la Armada, en Anderson Mesa, Arizona).





3. LAS FRANJAS DE INTERFERENCIA de una estrella (*izquierda*) tienen una mayor visibilidad, o contraste, para líneas de base cortas y, menor, para líneas de base largas. A partir de sus franjas (*derecha*) podemos deducir el diámetro de una estrella (su tamaño angular en el firmamento). Conforme aumenta la línea de base, la visibilidad de las franjas de una estrella grande cae más rápidamente que la de una estrella pequeña. Las mediciones de estrellas pequeñas requieren, por tanto, líneas de base muy largas.

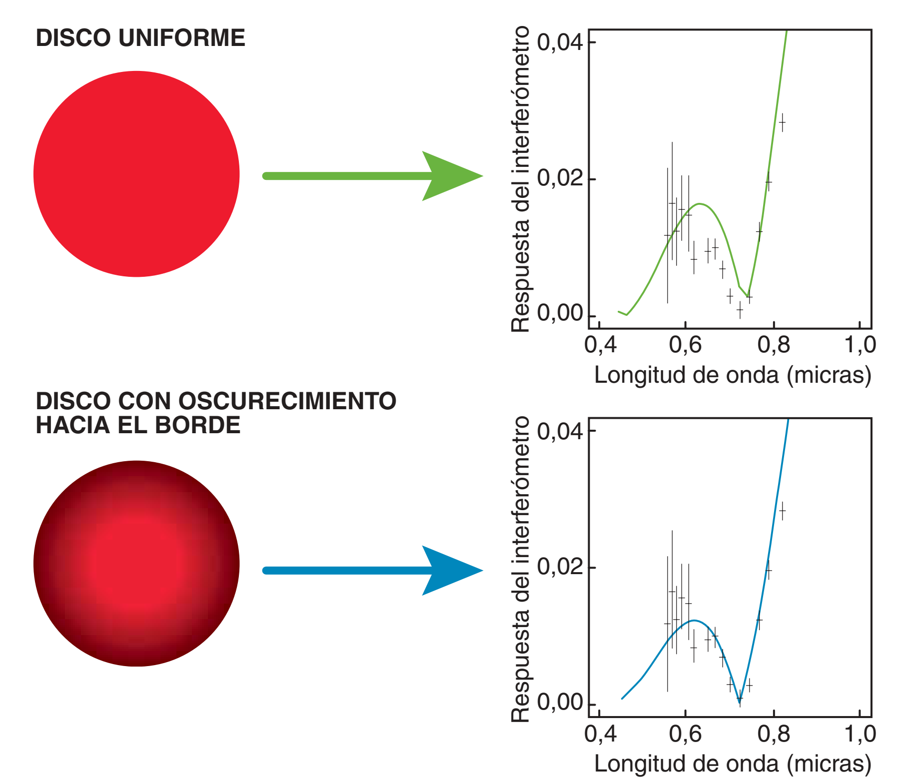
define la localización del foco.) El telescopio de menor apertura simulada opera de la misma forma: los dos segmentos de su espejo recogen luz y cada segmento envía simultáneamente su fracción de onda hacia el foco. Ambos telescopios producen la imagen en un detector (generalmente, un sistema de carga acoplada, CCD) que está ubicado en el foco, aunque la imagen procedente del telescopio de apertura simulada está degradada como consecuencia del carácter incompleto de su espejo primario.

En la posesión de dos espejos pequeños recolectores de luz, el interferómetro se parece al telescopio de apertura simulada. Pero difiere de éste en aspectos importantes. Primero, presenta instalados en monturas independientes los dos espejos, en vez de constituir una estructura rígida que apunta como un todo a una estrella. Se ha conseguido esa autonomía al separar, del proceso de combinar los haces de luz procedentes de cada espejo, la función de unirlos.

La segunda diferencia atañe a la combinación de la luz en sincronía. En general, uno de los espejos primarios está más próximo que el otro a la estrella objeto de estudio. Piénsese en una onda particular de luz que se ha emitido en forma de pulso desde una estrella. A menos que la estrella y los espejos estén colocados simétricamente, el pulso golpeará a un espejo antes que al otro. Para compensar esta diferencia de tiempo, el recorrido óptico desde un espejo hacia el detector común cuenta con un "camino" ajustable, llamado línea de retardo, que consta de espejos sobre un raíl, colocados con suma precisión.

La luz, y en ello reside la tercera diferencia, no se combina para producir una imagen de la estrella, sino para detectar la interferencia de los dos haces lumínicos. Cuando las crestas y los valles de las ondas coinciden (ondas "en fase"), asistimos a una interferencia constructiva, produciéndose una intensidad fuerte. La luz que se combina fuera de fase crea interferencias destructivas, dando lugar a una menor intensidad. Estas oscilaciones de brillo y oscuridad reciben el nombre de franjas.

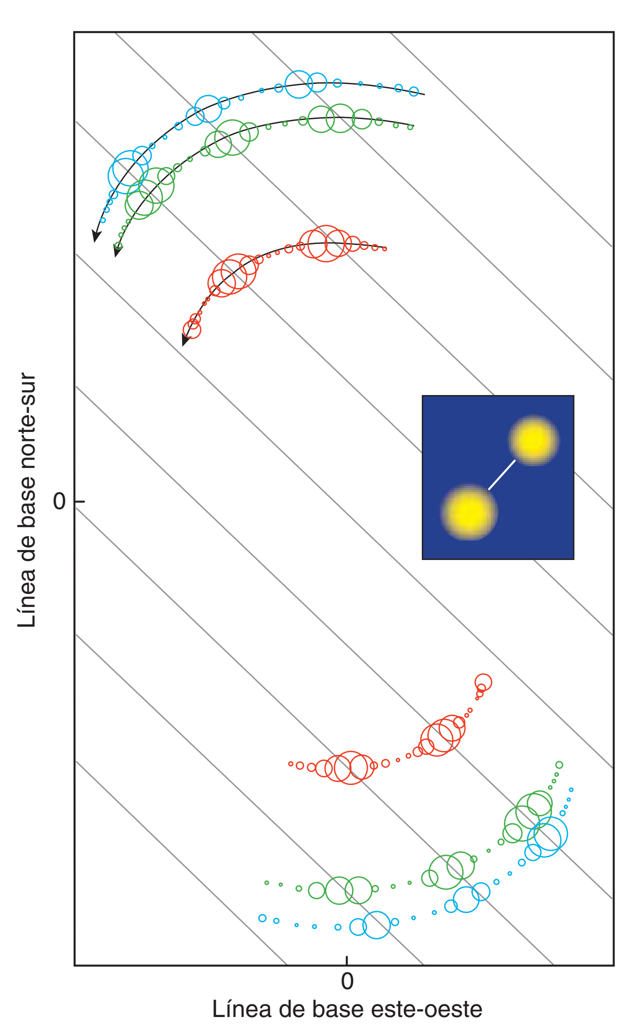
Los astrónomos miden el contraste de las franjas, la visibilidad. Varía



4. EL OSCURECIMIENTO hacia el borde de las estrellas se puede detectar con los interferómetros. Los datos de la estrella Alfa Cassiopeiae (*cruces*) se ajustan pobremente con curvas teóricas que describen un disco uniforme (*arriba*), pero encajan perfectamente con lo que se esperaría de un disco ligeramente mayor y afectado de oscurecimiento hacia el borde (*abajo*). Estos resultados facilitan información sobre las atmósferas de las estrellas; requieren, empero, líneas de base largas para alcanzar una resolución mayor que el diámetro de las estrellas.

ésta con las características de la fuente luminosa (por ejemplo, el tamaño físico de la estrella o la separación entre las dos de un sistema binario) y con la longitud y la orientación de la línea base del interferómetro, la línea que conecta los dos espejos. Se toman las mediciones desde diferentes líneas de bases, casi siempre esperando mientras gira la Tierra. Además, la mayoría de los interferómetros actuales cuentan con más de dos espejos, que pueden moverse a lo largo de raíles.

Las señales se analizan en un ordenador, recurriéndose a algoritmos de transformadas de Fourier para convertir las franjas medidas en mapas del objeto en estudio. Ese mapa es, de hecho, la misma imagen imperfecta que se vería con un telescopio de apertura simulada de un diámetro igual que la línea base del interferómetro. Así, aunque los resultados puedan tener una resolución muy buena, la información que facilitan es incompleta, algo así como observar una casa parcialmente escondida tras una valla de estacas separadas. A medida que se combinan observaciones tomadas a distintas líneas de base, la imagen se va completando, como veríamos la casa a través de la valla mientras paseamos en bicicleta.



5. LA ESTRELLA BINARIA Capella produjo este modelo particular de franjas en el interferómetro Mark III. A medida que la Tierra gira, la línea de base del interferómetro describe un arco elíptico. El tamaño de cada círculo indica la visibilidad de las franjas, observadas utilizando esa línea de base en cada una de las tres longitudes de onda (*colores*). Las líneas de intervalo igual atraviesan las posiciones de máxima visibilidad. Las dos estrellas en Capella deben estar orientadas en ángulos rectos con respecto a esas líneas (*recuadro*) y separadas por una distancia que depende del intervalo entre líneas.

Costes y complicaciones

La interferometría óptica no comporta los gastos y dificultades de construir un típico telescopio gigantesco, pero cuesta su precio. Hay que transportar los haces de luz procedentes de cada telescopio a lo largo de docenas o cientos de metros hasta la instalación central, donde se combinarán. Las diferentes longitudes de onda de la luz viajan a velocidades distintas a través del aire, lo que exige conducir los haces en el vacío. El gasto de la infraestructura se multiplica rápidamente conforme crecen el tamaño de la línea de base y el número de elementos del instrumento.

Un interferómetro con más de dos telescopios producirá imágenes más completas al obtener al mismo tiempo franjas procedentes de distintas líneas de base. Pero este procedimiento tiene sus propias limitaciones. Con un interferómetro de telescopios de 10 metros, por ejemplo, se requeriría dividir cada haz de luz en 9 fragmentos para combinarlos con los fragmentos de otros telescopios. Con tal división disminuye la sensibilidad del instrumento, puesto que cada grupo de franjas estará producido por un número menor de fotones. El límite práctico se halla en el intervalo de 5 a 20 telescopios. Es más, la complejidad de la óptica de combinación aumenta vertiginosamente, pues el número de líneas de base crece con la raíz cuadrada del número de telescopios. Así, dos telescopios tienen una sola línea de base; 10 telescopios, 45 líneas de base. Cada espejo instalado a lo largo de la trayectoria óptica consume un pequeño porcentaje de los fotones del haz.

La turbulencia atmosférica, el azote de los grandes telescopios, constituye, a su vez, una fuente de problemas para los interferómetros. Por su culpa, la posición aparente de la estrella en el cielo oscila con irregularidad. Esta oscilación determina a menudo que los haces de los dos brazos del interferómetro se superpongan de forma incorrecta o que no coincidan siquiera durante algunos intervalos de tiempo. Se podrían incluir sensores y espejos giratorios de respuesta rápida en el camino óptico —la técnica se tomaría prestada de la óptica adaptativa— para paliar en parte dicho problema.

Pero la turbulencia provoca un segundo contratiempo: añade un retraso aleatorio y cambiante a cada haz de luz, por la sencilla razón de que cada telescopio mira a través de una pauta distinta de turbulencia atmosférica. Conlleva ese efecto la degradación de la interferencia exigida para producir las franjas en el óptico; deber eliminarse, en todo lo que se pueda, para medir estrellas débiles y mejorar la precisión.

La aplicación de estas correcciones impone una serie de restricciones a la sensibilidad del interferómetro. No se pueden resolver sólo con incrementar el tamaño de los telescopios o con mayores tiempos de integración en la toma de datos: la información necesaria para realizar las correcciones —camuflada dentro de la luz procedente del objeto en estudio o de otra estrella brillante cercana— debe tomarse con aperturas no mayores que 20 cm (para así hacer un seguimiento de una mancha) y reunirse de nuevo en menos de 10 milisegundos (para que ni las manchas ni las franjas se hayan movido en demasía). Además, debe detectarse la misma señal de interferencia en un tiempo de combinación

ARSEN R. HAJIAN y J. THOMAS ARMSTRONG comparten desde hace tiempo el mismo interés por las técnicas de interferometría óptica. Hajian participa en proyectos del Interferómetro Optico Prototípico de la Armada (NPOI) desde 1995, labor que conjuga con su puesto de astrónomo en el Observatorio Naval de los EE.UU. Armstrong, adscrito al Laboratorio de Investigación Naval en Washington, ha trabajado en interferometría óptica desde 1989, cuando se integró en el proyecto Mark III de observación de estrellas binarias.

de milisegundos con el fin de evitar que se diluya por las fluctuaciones atmosféricas.

El utillaje requerido para todas estas funciones va desde detectores de fotones de alta velocidad hasta láseres de alta frecuencia que controlan el retardo introducido en escalas de milisegundos, pasando por ordenadores capaces de almacenar al menos varios gigabytes de información por noche. A estas herramientas, desarrolladas a lo largo de los últimos 20 o 30 años, empezamos ahora a sacarles buen partido.

Lo que vendrá

Las dificultades expuestas convergen en la mayor desventaja de los interferómetros ópticos actuales: no son más sensibles que el ojo humano, aunque sí cuentan con una mayor resolución. No obstante, aun limitados al estudio de los miles de estrellas brillantes de nuestro firmamento, los interferómetros están ya produciendo una copiosa cosecha de datos observacionales, y proporcionando resultados únicos que justifican el esfuerzo empeñado. Y todas las limitaciones se superarán en el futuro cuando los sistemas avanzados de óptica adaptativa se instalen en los grandes telescopios.

En los últimos años, los astrónomos han construido varios interferómetros en el óptico e infrarrojo. Muy pronto contaremos con interferómetros ópticos con varios telescopios. En esa senda, el Interferómetro Optico Prototípico de la Marina (NPOI), de Anderson Mesa en Arizona, dispondrá de seis aperturas y 15 líneas de base dentro de un año. En principio, con suficiente cantidad de datos, se pueden obtener mapas de las estrellas empleando métodos similares a los de interferometría en radio. Pero en la práctica tales métodos tradicionales sólo pueden aplicarse a la interferometría óptica en los casos elementales: las estrellas binarias. Se trabaja en la elaboración de algoritmos depurados para producir los mapas ópticos de cualquier fuente, verbigracia, estrellas elípticas, estrellas con manchas y estrellas cuya materia se escapa de su superficie. Los interferómetros ópticos aún tienen que refinarse más para alcanzar a sus primos que operan a mayores longitudes de onda, las ondas radio.

Los que utilizan un sistema avanzado de óptica adaptativa, así el interferómetro Keck (dos telescopios de 10 metros separados por 85 metros) y el interferómetro de grandes telescopios (VLTI, un sistema de cuatro telescopios de 8 metros de diámetro en Chile), estarán preparados para recabar imágenes de una soberbia resolución de fenómenos astronómicos débiles. A esas dos instalaciones acompañarán telescopios menores y más espaciados. La Misión Espacial de Interferometría (SIM), el Buscador de Planetas Terrestres (TPF) y la Misión de Imágenes de Microsegundos en Rayos-X (MAXIM) empujarán a la astrometría (la ciencia para medir posiciones de las estrellas) hacia el dominio de los *micro*segundos de arco y detectarán planetas allende el sistema solar. Un aluvión de resultados científicos y técnicos está por venir. Con la interferometría y todo, nuestros hijos seguirán buscando compañeros de juegos en otros planetas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE INTENSITY INTERFEROMETER: ITS APPLICATION TO ASTRONOMY. R. Hanbury Brown. Halsted Press, 1974.

BOFFIN: A PERSONAL STORY OF THE EARLY DAYS OF RADAR, RADIO ASTRONOMY, AND QUANTUM OPTICS. R. Hanbury Brown. Adam Hilger, 1991.

LONG-BASELINE OPTICAL AND INFRARED STELLAR INTERFEROMETRY. M. Shao y M. M. Colavita en *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, vol. 30, págs. 457-498; 1992.

STELLAR OPTICAL INTERFEROMETRY IN THE 1990S. J. Thomas Armstrong, Donald J. Hutter, Kenneth J. Johnston y David Mozurkewich en *Physics Today*, vol. 48, n.º 5, págs. 42-49; mayo 1995.

Lluvias torrenciales

La influencia determinante de los factores que intervienen en el desarrollo de lluvias torrenciales puede investigarse a través de técnicas de simulación numérica

Clemente Ramis, Romualdo Romero, Víctor Homar y Sergio Alonso

Con la potencia creciente de los ordenadores, la simulación numérica se ha sumado a las vías clásicas de investigación, entendiendo por tales la observación, la experimentación y el desarrollo teórico. Con la simulación numérica se busca la reproducción aproximada, mediante ordenador, del fenómeno abordado.

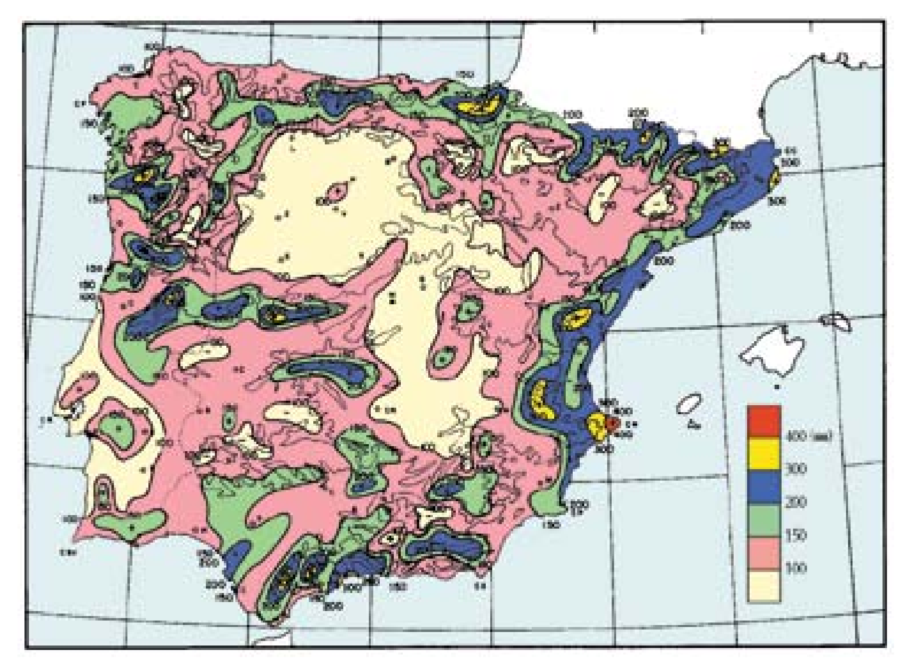
Gracias a la simulación numérica, la ciencia ha recibido un impulso extraordinario, sobre todo en los campos donde los métodos tradicionales se ven superados. La meteorología, en particular. Podemos acometer observaciones de la atmósfera, inferir su comportamiento o prever su evolución, pero resulta de todo punto imposible provocar que la atmósfera repita un mismo estado. Además, el número de observaciones atmosféricas es siempre limitado. Queda fuera de nuestro alcance obtener información de todos los procesos que ocurren en un momento considerado.

Tampoco podemos recurrir a la experimentación para conocer el curso evolutivo de un meteoro. Ni la vía teórica aporta soluciones al problema por sí sola. Las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento atmosférico no admiten solución analítica.

Descartados esos métodos de aproximación, la simulación numérica se convierte en áncora de esperanza. A la circulación atmosférica se dedicó la primera simulación numérica con fines pacíficos, que se realizó con el ordenador ENIAC. Los modelos numéricos meteorológicos se han ido refinando y, hoy, simulan con fiabilidad el comportamiento atmosférico, al menos para intervalos de tres o cuatro días. En ellos se apoyan las predicciones del "hombre del tiempo". Pero esos modelos operativos se revelan todavía incapaces de resolver los problemas asociados al carácter caótico de la atmósfera.

La simulación de lluvias muy intensas, producidas por nubes de desarrollo vertical o convectivas, constituye uno de los problemas sin resolver en los modelos operativos. El tamaño demasiado pequeño de dichas nubes se resiste a la simulación y, además, los fenómenos turbulentos se escapan a la resolución del modelo. Sin embargo, algunos modelos de investigación sí pueden simular explícitamente las nubes convectivas. Se les exige una gran resolución espacial y precisan una enorme potencia de cálculo.

Las lluvias torrenciales —así se califican las precipitaciones superiores



1. DISTRIBUCION sobre la península Ibérica de la precipitación máxima registrada en 24 horas (Font Tullot, 1983). Las lluvias torrenciales —así se califican las precipitaciones superiores a 200 mm en 24 horas— son una característica climática del levante español, incluidas las islas Baleares. Suelen producirse a finales de verano o en otoño. Las lluvias torrenciales arrasan suelos muy débiles y provocan inundaciones catastróficas para la industria, la agricultura, viviendas y vías de comunicación.

CLEMENTE RAMIS, ROMUALDO ROMERO, VICTOR HOMAR y SERGIO ALONSO conforman el Grupo de Meteorología de la Universidad de las islas Baleares, cuya línea principal de investigación son las lluvias intensas del Mediterráneo occidental. De ese centro superior, Alonso es catedrático, Ramis profesor titular, Romero ayudante y Homar becario de investigación.

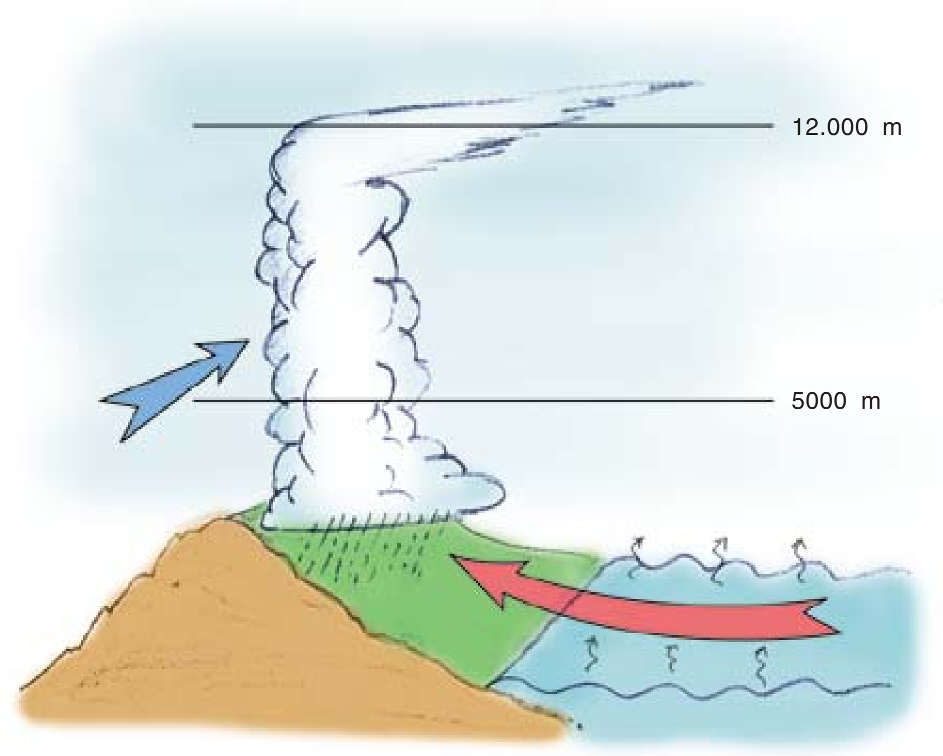
a 200 mm en 24 horas— son una característica climática del levante español, incluidas las islas Baleares. La mayoría de tales precipitaciones se producen a finales de verano o en otoño, aunque también pueden darse en invierno. Arrasan suelos muy débiles y provocan inundaciones catastróficas para la industria, la agricultura, viviendas y vías de comunicación.

Desde hace años se conocen las situaciones meteorológicas de gran escala que dan lugar a una lluvia torrencial en la zona mediterránea. Se dispone incluso de un modelo conceptual. En la mayoría de los casos, se parte de la presencia, en superficie, de un anticiclón sobre Europa central y una depresión sobre el sur de la península Ibérica. Ambos sistemas báricos producen un flujo de componente este sobre el Mediterráneo, que transporta aire cálido y húmedo a la costa. En niveles medios troposféricos (500 hPa, unos 5500 metros), una depresión situada sobre el sudoeste de la península Ibérica envía aire húmedo a la costa mediterránea española.

La existencia de aire muy húmedo en toda la columna atmosférica constituye una condición necesaria para que la convección engendre lluvias intensas. En un ambiente muy húmedo, los productos de condensación que precipitan desde grandes alturas no se evaporarán en su caída. El Mediterráneo, caliente a finales de verano y en otoño, aporta vapor de agua al aire. El aire cálido y húmedo, al llegar a la costa, asciende obligado por la orografía costera y forma nubes convectivas.

Este modelo conceptual, que conjuga numerosos procesos físicos, constituye un mecanismo de desarrollo de convección y de lluvias intensas. Incluso podría parecer sencillo predecir, con cierta antelación (24-48 horas), las lluvias torrenciales mediante la aplicación del modelo conceptual a los campos meteorológicos, que representan el estado atmosférico, previstos por un modelo numérico operativo.

Pero antes de elaborar una predicción útil hemos de contestar varias preguntas: ¿dónde caerá la lluvia? ¿Qué cantidad de precipitación se registrará? ¿A qué hora lloverá con mayor intensidad? El modelo conceptual no resuelve estas cuestiones, que se dejan al albur de la experiencia del predictor. Muchas otras cuestiones podrían añadirse a la lista, si incluimos procesos subsiguientes al chaparrón: ¿cuál es la orografía de la región? ¿Determina ésta la cuenca de un río? ¿Cuál será la respuesta de la cuenca a la precipitación caída?



2. MODELO CONCEPTUAL de desarrollo de lluvias torrenciales en la zona costera mediterránea. La flecha roja a bajo nivel representa aire cálido y húmedo procedente del este. La flecha azul a nivel alto representa aire fresco y húmedo procedente del sudoeste.

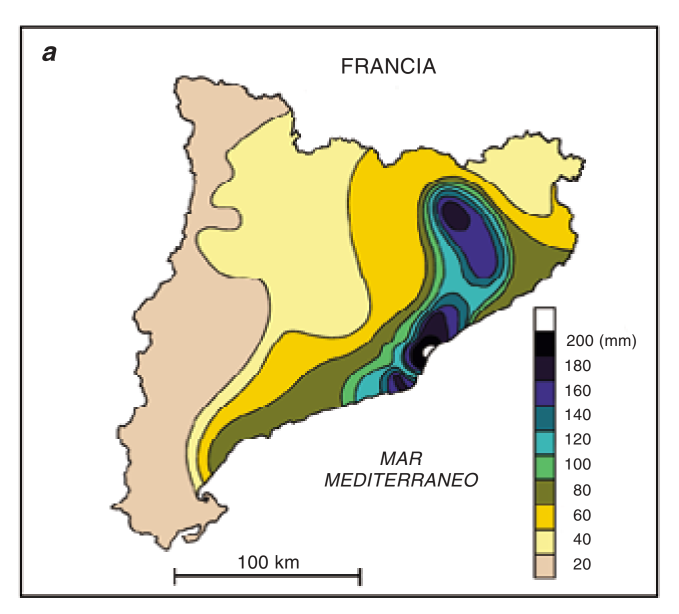
Los modelos meteorológicos numéricos aportan una solución, parcial al menos, de esa gavilla de interrogantes. Más, incluso. El modelo numérico nos permite validar, o retocar, el modelo conceptual y estudiar si la orografía causa la convección y si el Mediterráneo es la fuente que alimenta con vapor de agua el aire que incide contra la orografía costera.

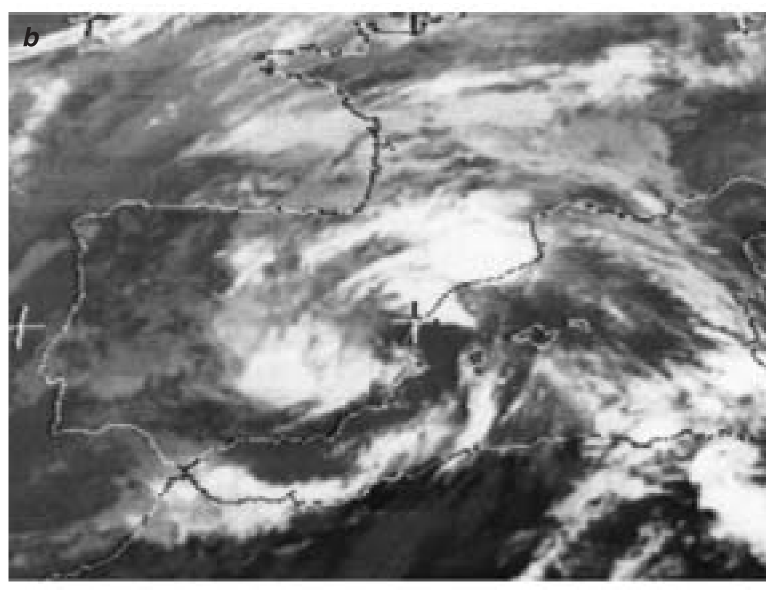
Las predicciones a muy corto plazo, del orden de horas, pueden ser más detalladas y determinar con bastante precisión las áreas que se verán afectadas por lluvias intensas. Sin embargo, estas predicciones presentan un inconveniente. Por ser de pocas horas, no da tiempo a tomar todas las medidas necesarias para controlar y mitigar las pérdidas derivables de las inundaciones. La cantidad descargada se escapa a una predicción precisa y hay que acudir a procedimientos indirectos, que identifiquen la capacidad potencial de los sistemas convectivos causantes de la precipitación para mejorarla.

El meteorólogo cuenta para ello con observaciones sobre tierra (viento, presión, temperatura o humedad), con observaciones de las nubes desde el espacio mediante satélites meteorológicos (el Meteosat produce una imagen cada 30 minutos) y desde tierra mediante el radar (generalmente una observación cada 10 minutos). La evolución temporal de las señales de los sensores permite estimar la potencia de las nubes convectivas, fase de su ciclo de vida e intensidad de la precipitación.

Abundan los registros históricos de lluvias intensas en el oriente español. Recordaremos tres de entre los que anotaron una precipitación diaria superior a los 200 mm en algún punto. Nuestro primer episodio se produjo el 12 de noviembre de 1988.

Durante la tarde y primeras horas de la noche de ese día se produjeron lluvias intensas en Cataluña. Los ríos se desbordaron y hubo bajas, amén de cuantiosas pérdidas. Desde el día 12 a las 8 de la mañana hasta el día 13 a las 8 de la mañana se superaron los 100 mm en una zona próxima a la costa norte con valores locales de 200 mm. La imagen del Meteosat a las 12 horas mostraba un sistema nuboso sobre Cataluña, que alcanzaba grandes alturas, con nubes más bajas sobre el mar.





3. PRECIPITACION registrada (en milímetros) en Cataluña el 12 de noviembre de 1988 (*a*). Imagen del canal infrarrojo del Meteosat correspondiente al 12 de noviembre de 1988 a las 12 horas. Las cimas más frías de las nubes aparecen en blanco (*b*). Situación

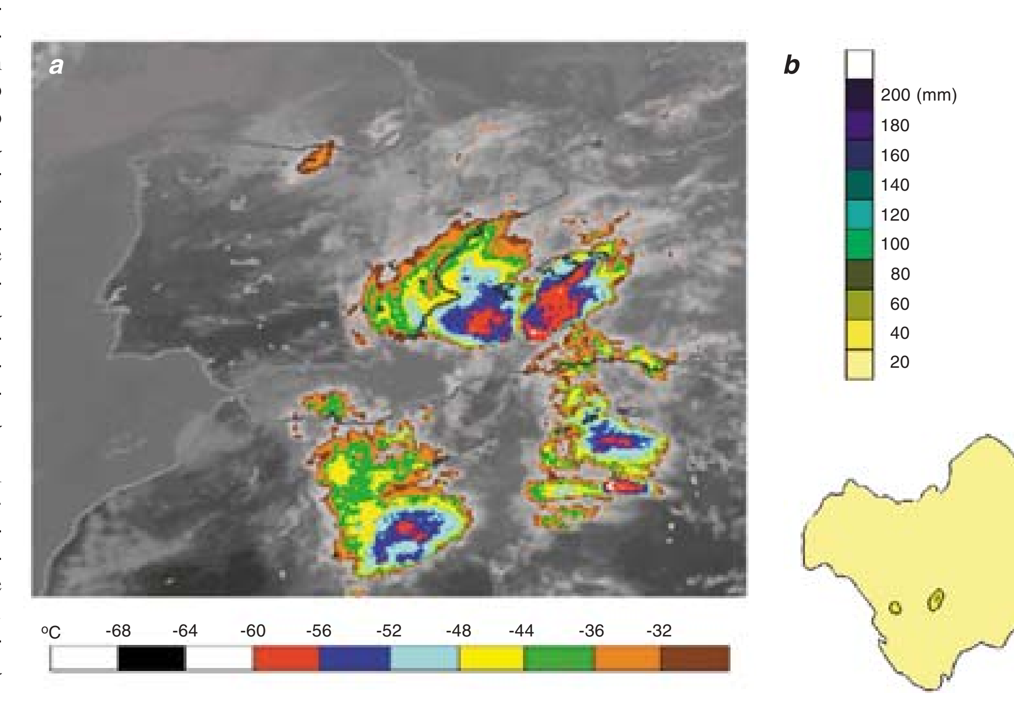
La situación meteorológica a las 12 horas se ajustaba en muchos aspectos a la indicada en el modelo conceptual. En los niveles próximos al suelo había aire cálido y húmedo sobre el Mediterráneo que se dirigía hacia Cataluña, mientras que en niveles más altos persistía una depresión sobre el sur de la península, que favorecía la entrada de aire húmedo en dichos niveles.

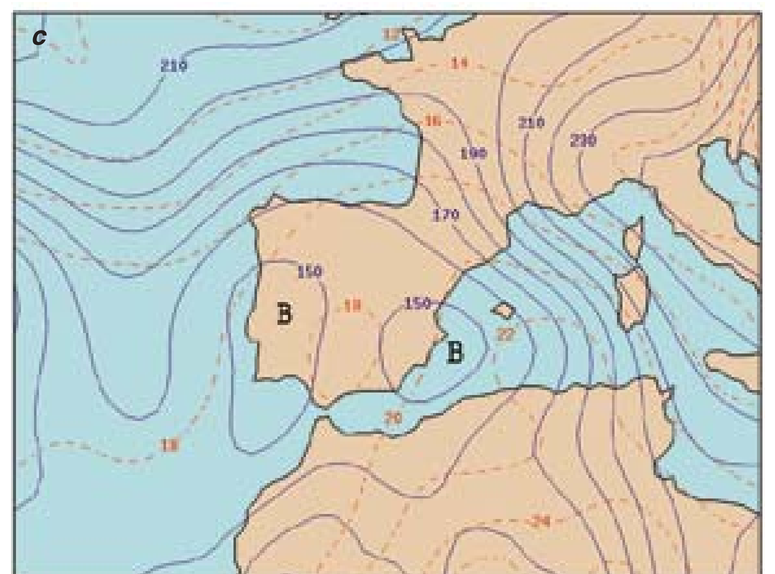
El segundo episodio escogido se produjo el 28 de septiembre de 1994. La imagen del Meteosat de las 12 horas mostraba dos sistemas convectivos sobre el Mediterráneo. Uno de ellos procedió a lo largo de la costa, mientras que el otro avanzaba hacia el nordeste sobrepasando las islas Baleares. Ambos sistemas dieron lugar a precipitaciones importantes sobre tierra (más de 140 mm en algunos puntos). Pero el grueso cayó sobre el mar, según registro del radar instalado en Valencia. La situación meteorológica correspondiente al día 28 a las 12 horas evidenciaba la presencia, en los niveles bajos, de un flujo del este de aire cálido y húmedo sobre el Mediterráneo; en niveles medios, había una depresión profunda sobre el sudoeste peninsular, que producía flujo del sur sobre el Mediterráneo occidental y la mitad oriental de la península.

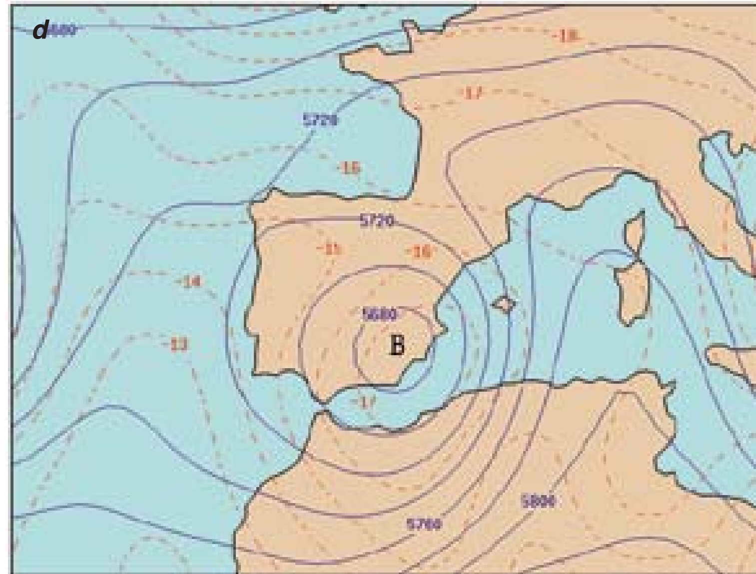
El tercer ejemplo lleva fechas del 9 y 10 de octubre de 1994. El municipio tarraconense de Alforja sufrió las lluvias más intensas del temporal que se desencadenó sobre Cataluña esos días, con 450 mm. Hubo que lamentar víctimas y pérdidas materiales. De acuerdo con la imagen del satélite Meteosat de las 06 horas del día 10, se había formado una estructura convectiva con temperaturas muy bajas en su cima, localizada sobre el sur de Cataluña. La situación meteorológica indicaba la presencia de una masa de aire cálido y húmedo sobre el Mediterráneo transportada hacia la costa por vientos del este y del sudeste. En niveles medios había una depresión sobre el sudoeste peninsular, que provocaba vientos del sur sobre la costa y aportaba aire húmedo desde latitudes más bajas.

Los tres episodios presentaban, a grandes rasgos, características comunes, similares a las del modelo conceptual. Los mapas de isoyetas (líneas de igual precipitación) nos revelaban, sin embargo, que las precipitaciones más intensas se produjeron en lugares diferentes.

Pasemos al modelo numérico. Se trata de un esquema físico-matemático del comportamiento de la atmósfera que se expresa mediante ciertas ecuaciones escritas de forma inteligible para el ordenador. Se parte







meteorológica del 12 de noviembre de 1988 a las 12 horas: (*c*) 1000 hPa, (*d*) 500 hPa, unos 5500 metros. Las líneas continuas representan la altura, aproximadamente en metros, de la superficie isobárica y las discontinuas la temperatura en grados centígrados.

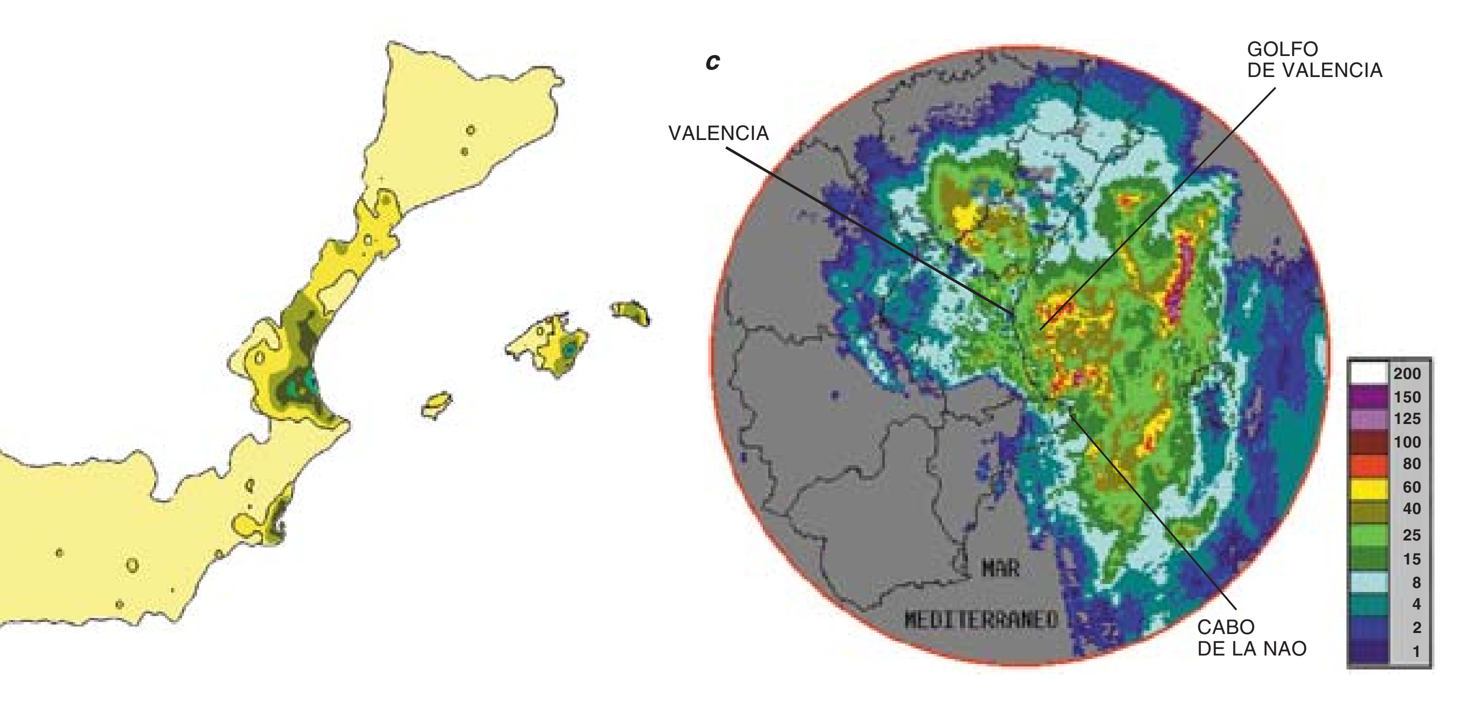
de un estado inicial de la atmósfera y, aplicando las ecuaciones, el ordenador determina el estado de la misma al cabo de cierto tiempo.

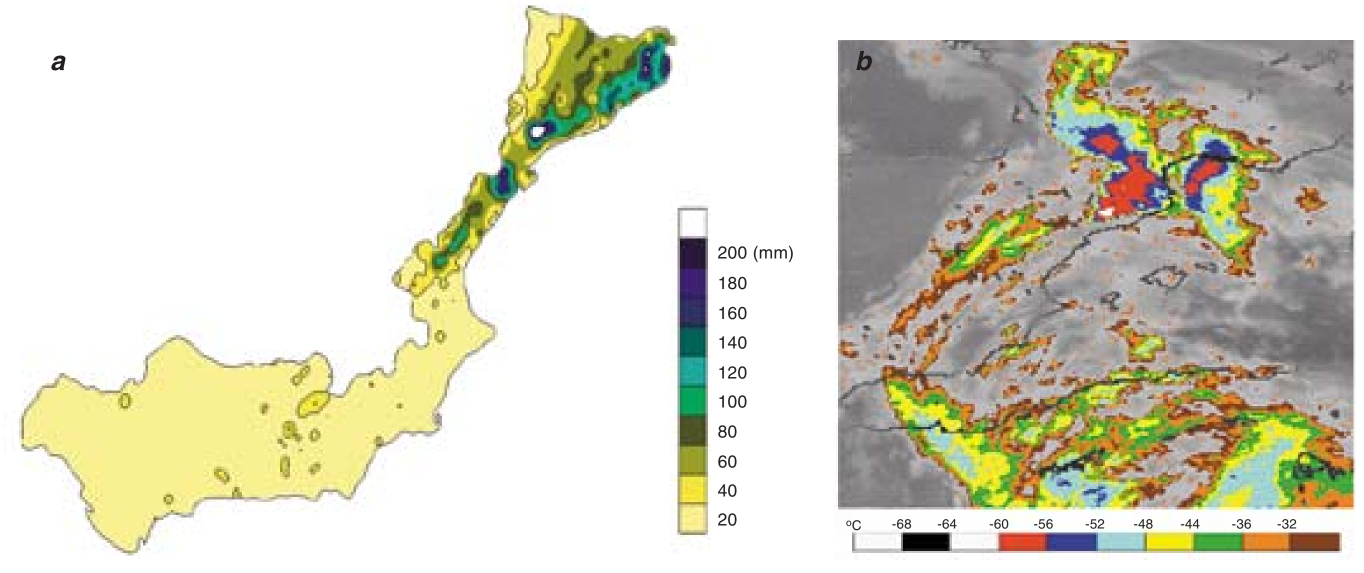
El estado de la atmósfera en un instante dado viene representado por la distribución tridimensional de la presión, temperatura, humedad, movimiento (viento) y demás variables físicas que la caracterizan. Las ecuaciones a resolver indican la variación de esas magnitudes en el transcurso del tiempo (ecuaciones de pronóstico), una vez conocidas las fuerzas que intervienen.

En realidad, las ecuaciones deberían aplicarse a cada punto de la atmósfera. Pero eso es absolutamente imposible. El modelo numérico tiene que ceñirse a un número limitado de puntos. Existen, además, restricciones matemáticas que impiden obtener en unos pocos pasos de tiempo el estado final si el plazo de predicción abarca varias horas. De ahí que las ecuaciones de pronóstico se apliquen partiendo de resultados obtenidos en un paso anterior.

¿A qué puntos han de aplicarse las ecuaciones? Para responder, distingamos primero entre modelos de área limitada y modelos globales; aquéllos se aplican a una pequeña porción de la Tierra, éstos al planeta entero. En los modelos de área limitada se construye una malla tridimensional; sólo se consideran los puntos de nudos de la malla. La distancia

4. IMAGEN DEL CANAL INFRARROJO del Meteosat correspondiente al 28 de septiembre de 1994 a las 12 horas. Los colores indican la temperatura de la cima de las nubes (*a*). Precipitación registrada (en milímetros) en el área mediterránea española el 28 de septiembre de 1994 (*b*). Precipitación estimada (en milímetros) por el radar de Valencia el 28 de septiembre de 1994 (*c*).





5. PRECIPITACION REGISTRADA (en milímetros) en la zona mediterránea peninsular española el 10 de octubre de 1994 (*a*). Imagen del canal infrarrojo del Meteosat correspondiente al 10 de octubre de 1994 a las 06 horas. Los colores indican la temperatura de la cima de las nubes (*b*).

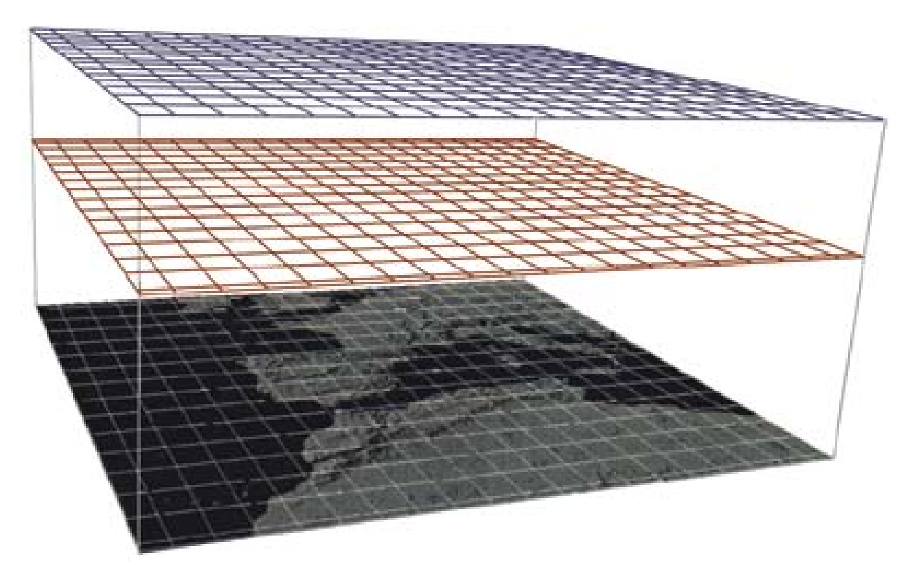
horizontal entre nudos define la resolución del modelo. Para dar cuenta de la estructura tridimensional de la atmósfera, se consideran varios niveles en vertical.

La introducción de la orografía permite distinguir entre mar y tierra, cuya interacción con la atmósfera se toma en cuenta mediante un submodelo que conjuga la textura del suelo, la temperatura y el contenido de agua, así como el tipo, cantidad y estado de la vegetación que lo cubre, entre otras características.

Asimismo es preciso conocer la energía solar que alcanza el suelo, motivo por el cual el modelo numérico incluye también un submodelo de radiación. La energía que llega al suelo depende de la composición de la atmósfera y de la cantidad y clase de nubes que cubren el cielo en un momento determinado. La evaporación de agua del mar se calcula por medio de la temperatura de su superficie y la humedad del aire. Por lo que atañe a la capacidad de difusión vertical de la atmósfera, otro factor necesario, se recurre a expresiones que permiten estimarla en términos de la estabilidad de estratificación del aire y la cizalladura del viento.

Los procesos de condensación del vapor de agua para producir nubes y lluvia reciben un tratamiento especial por su valor predictivo intrínseco y por la liberación de calor latente, que influye en la posterior evolución del resto de variables.

Se considera también la posibilidad de que existan nubes convectivas y nubes estratificadas. Como las nubes se producen donde hay movimientos ascendentes, la velocidad vertical es una variable crítica en los modelos numéricos. Atendiendo a su determinación, se distinguen dos tipos de modelos: hidrostáticos y no hidrostáticos. En los primeros, la velocidad vertical se deduce a partir de otras variables del modelo (en un proceso de diagnóstico), mientras que en los no hidrostáticos la velocidad vertical tiene su propia ecuación de pronóstico.

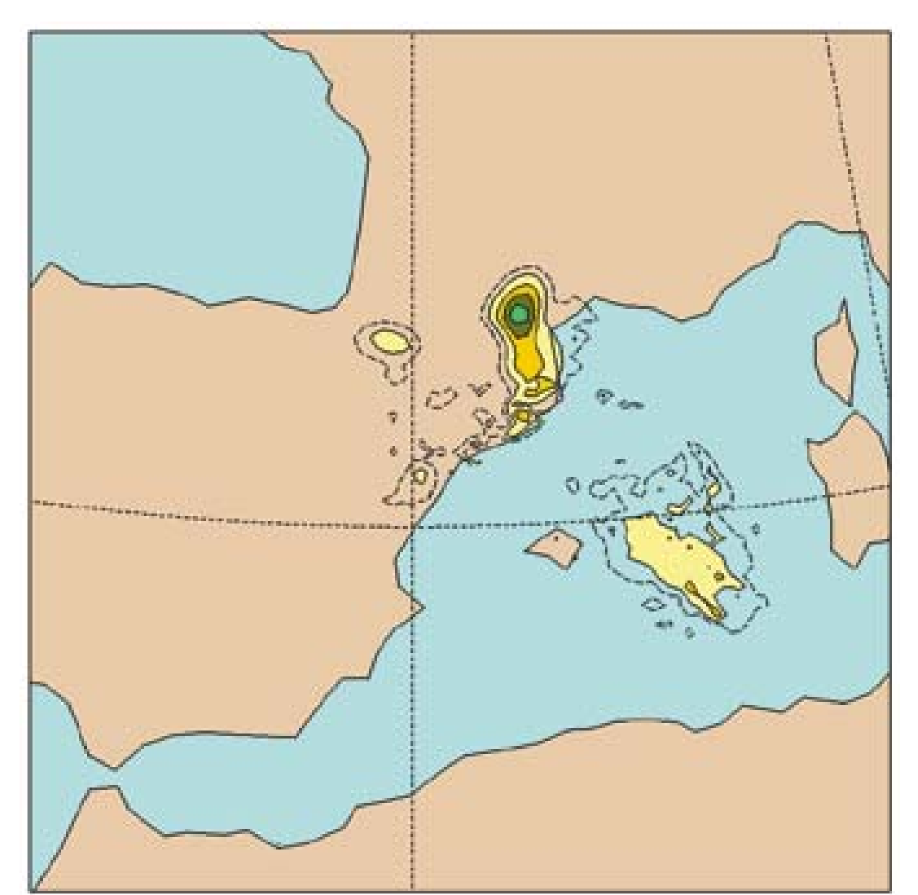


6. ESQUEMA DE LA MALLA que se define para fijar los puntos a los cuales se aplican las ecuaciones del modelo numérico.

Los modelos numéricos utilizados en este estudio se reducen a dos principales, el SALSA y el HIRLAM. El primero, siglas de "Simulación sobre un Area Limitada de Sistemas Atmosféricos", se ha desarrollado en Estados Unidos y Francia. España, con otros países europeos, ha intervenido en la creación del HIRLAM (*HI*gh *R*esolution *L*imited *A*rea *M*odel). Este es el que utiliza el Instituto Nacional de Meteorología para sus predicciones de hasta 48 horas. Ambos modelos son hidrostáticos e incluyen los procesos físicos comentados.

Hemos realizado varias simulaciones de los tres casos de lluvia torrencial descritos. En el primer y el tercer casos se empleó el modelo SALSA; en el segundo, el HIRLAM. Se aplicó el SALSA a un área de 1800 por 1800 km^2 con centro en 1º E 41º N, con una resolución de 20 km; se consideraron 31 niveles en la

7. PRECIPITACIONES SIMULADAS por el modelo SALSA entre las 12 y las 24 horas del 12 de noviembre de 1988. Los colores indican cantidades de precipitación según la escala de la figura 3a. La línea discontinua es la isoyeta de 10 mm.



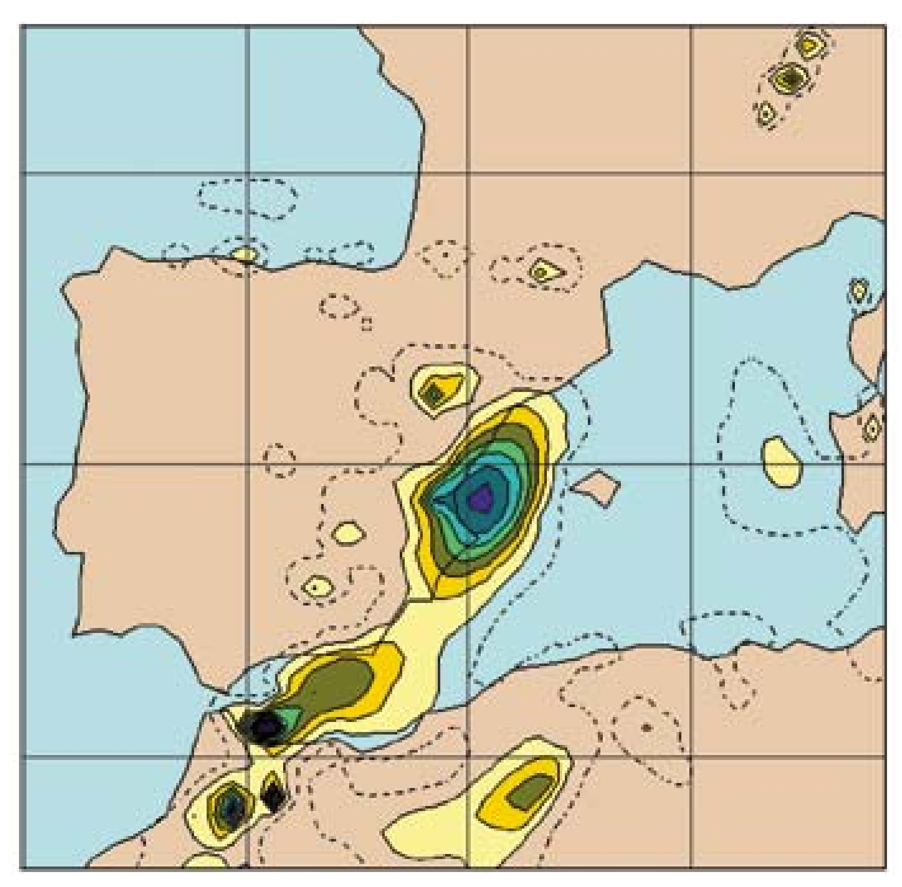
dirección vertical que se extienden desde la superficie de la Tierra hasta unos 40 km de altura. El área incluye los sistemas montañosos de la península Ibérica, parte de los Alpes y del Atlas y prácticamente todo el Mediterráneo occidental. El área abarcada en el modelo HIRLAM, mayor, cubre unos 6000 por 3000 km^2 con una resolución de 30 km y 31 niveles en la vertical.

En ambos modelos numéricos se han incorporado los tipos de suelo y de vegetación presentes en la región. La situación meteorológica inicial y la temperatura superficial del mar se han obtenido de los análisis del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio, sito en Reading.

Para el caso del 12 de noviembre de 1988 se realizó una simulación de 12 horas, desde las 12 hasta las 24 horas. El modelo da lluvias sobre Cataluña y sobre el mar, aunque las mayores cantidades están localizadas en el norte de la región. Sobre la costa se obtienen cantidades considerables, aunque inferiores a las observadas en la realidad. Si comparamos el campo de precipitación del modelo con el observado, se aprecia una aceptable correlación espacial, lo que nos indica que este resultado es una buena guía para el predictor. Análogamente, el modelo indica que la mayor parte de la precipitación es de origen convectivo, en concordancia con lo que puede deducirse de las imágenes del satélite Meteosat.

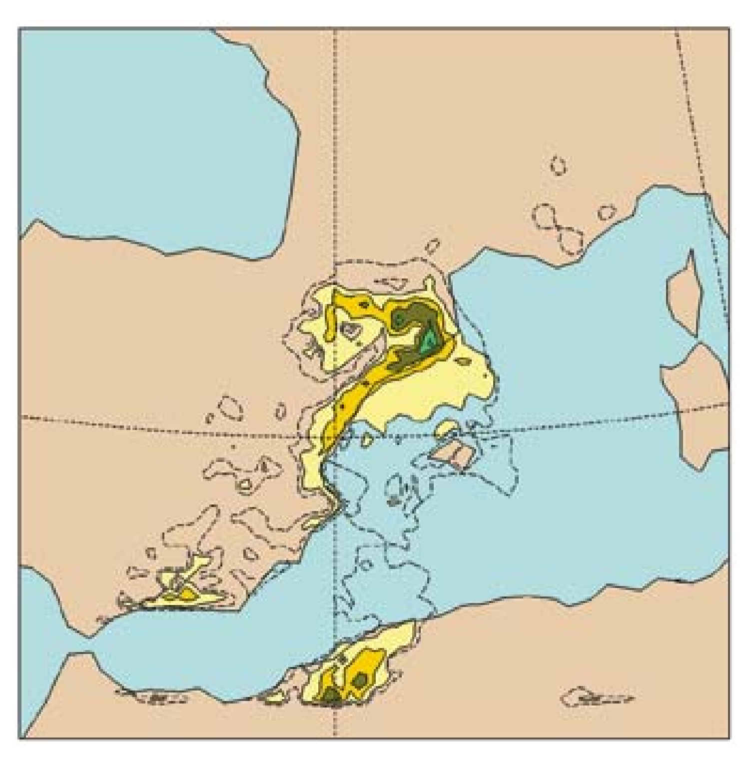
Para el segundo caso, 28 de septiembre de 1994, la simulación comprendió un intervalo de 30 horas, desde las 00 horas del 28 a las 06 horas del 29. La mayor precipitación se encuentra sobre el mar, cerca de la costa de Valencia, con una zona de precipitación importante sobre tierra. El modelo es capaz de reproducir, excepto en los detalles, la distribución de lluvia que se dedujo del radar de Valencia. Y sitúa correctamente los centros de mayor precipitación. Sus resultados constituyen, en definitiva, una buena guía para la predicción.

El tercer caso de nuestra simulación numérica, 9 y 10 de octubre de 1994, constó de dos experimentos. El primero desde las 00 horas del 9 hasta



8. PRECIPITACION SIMULADA por el modelo HIRLAM para el 28 de septiembre de 1994. Los colores indican cantidades de lluvia según la escala de la figura 4b. La línea discontinua es la isoyeta de 5 mm.

las 06 del 10 y el segundo desde las 00 del 10 hasta las 06 del 11. Para el día 9, el modelo dio las mayores precipitaciones en la costa de Valencia. Para el día 10, las mayores precipitaciones se trasladan hacia la zona costera catalana. También en este caso las cantidades que da el modelo numérico son inferiores a las observadas, pero la localización espacial guarda una buena correlación con la precipitación real. La mayor parte de la precipitación simulada por el modelo es convectiva, de acuerdo con la información aportada por el Meteosat.



9. PRECIPITACION SIMULADA por el modelo SALSA para el 10 de octubre de 1994. Los colores indican cantidades de lluvia según la escala de la figura 5a. La línea discontinua es la isoyeta de 10 mm.

La simulación numérica permite estudiar la influencia de los diversos factores en el desarrollo de la lluvia intensa, así como realizar simulaciones en diferentes condiciones y, comparando los resultados, obtener información sobre la influencia de los factores que interesan.

En particular, se pueden realizar simulaciones sin considerar la orografía. Con ello se elimina la influencia de las montañas en el movimiento atmosférico y en el desarrollo de tormentas. O se puede prescindir de la evaporación desde el mar, eliminando así una fuente de vapor de agua hacia la atmósfera. En los experimentos de simulación numérica se han introducido los dos factores porque son los que tiene en cuenta el modelo conceptual y porque la acción física que conllevan pone de manifiesto su carácter fundamental.

Si se desea estudiar el efecto de ambos factores, no basta con realizar tres simulaciones numéricas obvias: la que considere el modelo completo (f_{12}), la que prescinda de la orografía y la que deje de lado la evaporación. Por ser no lineales las ecuaciones que rigen el comportamiento atmosférico, si se procediera así olvidaríamos el efecto sinérgico de la interacción entre la orografía y la evaporación. Si se compara el experimento completo con el que prescinde de la orografía, no obtendríamos el efecto singular de ésta.

Para resolver el problema es preciso realizar cuatro simulaciones. Primera, el experimento completo f_{12}; segunda, el experimento f_0, que deja de lado la orografía y la evaporación del agua del mar. La tercera simulación, f_1, involucra la orografía pero no la evaporación, en tanto que la cuarta, experimento f_2, silencia la orografía aunque no la evaporación. Podemos entonces separar la influencia de cada factor e incluso el efecto de interacción entre ambos. El efecto de la orografía sería $f_1 - f_0$; el de la evaporación, $f_2 - f_0$; el efecto de la interacción, $f_{12} - (f_1 + f_2) + f_0$.

Aplicada esa técnica de separación a nuestros casos de estudio, se han obtenido resultados interesantes. Para el episodio del 12 de noviembre de 1988, se observa que la orografía, la costera en particular, produce un efecto importante, siendo despreciable el efecto de la evaporación. Mayor interés reviste el efecto sinérgico, que localiza su acción positiva sobre la costa.

Los experimentos numéricos demuestran la debilidad de la dinámica atmosférica a gran escala, pues no implica movimientos ascendentes importantes, ni condensación abundante, ni formación de lluvia. Inicialmente la baja atmósfera contenía suficiente vapor de agua para dar lugar a precipitaciones, dada la orografía. El resultado de la simulación numérica no se ajusta del todo al modelo conceptual, ya que la evaporación desde el mar durante las horas previas al evento no es decisiva.

En las precipitaciones intensas de la costa de Valencia de los días 28 y 29 de septiembre de 1994 las nubes convectivas se desarrollaron sobre el mar. La acción de la orografía, más que provocar la precipitación y centrarla en una región determinada, se limita a producir pequeñas modificaciones de la distribución espacial. Se advierten mecanismos dinámicos de gran escala que disparan la convección. El análisis de la situación meteorológica permite atribuir las corrientes verticales a una corriente en chorro sobre el Mediterráneo.

En las precipitaciones de Cataluña de los días 9 y 10 de octubre de 1994 la orografía resultó determinante, sobre todo en la zona costera y Pirineos. En la simulación numérica se aprecia que el efecto de la evaporación desde el mar es despreciable; en ausencia de orografía, la precipitación es similar, haya o no evaporación. Por último, de acuerdo con el modelo numérico el efecto más importante es el sinérgico de interacción entre la orografía y la evaporación.

Las simulaciones muestran que las montañas costeras pueden desarrollar precipitación, en algunas zonas, con la humedad presente inicialmente en la atmósfera; que la dinámica a gran escala de la situación meteorológica es débil y no posibilita ascensos suficientemente fuertes que, por sí mismos, puedan desarrollar lluvia intensa, y, por último, que la interacción orografía-evaporación es el factor decisivo en la distribución de la precipitación torrencial sobre Cataluña. La simulación numérica se ajusta aquí al modelo conceptual.

Los resultados de la simulación numérica de los tres casos de lluvia muy intensa en la costa mediterránea permiten extraer varias conclu-

siones. Los modelos numéricos actuales sobre predicción de lluvias intensas a plazo corto (36-48 horas) suministran una información fiable y valiosa al localizar con bastante precisión las áreas de precipitación.

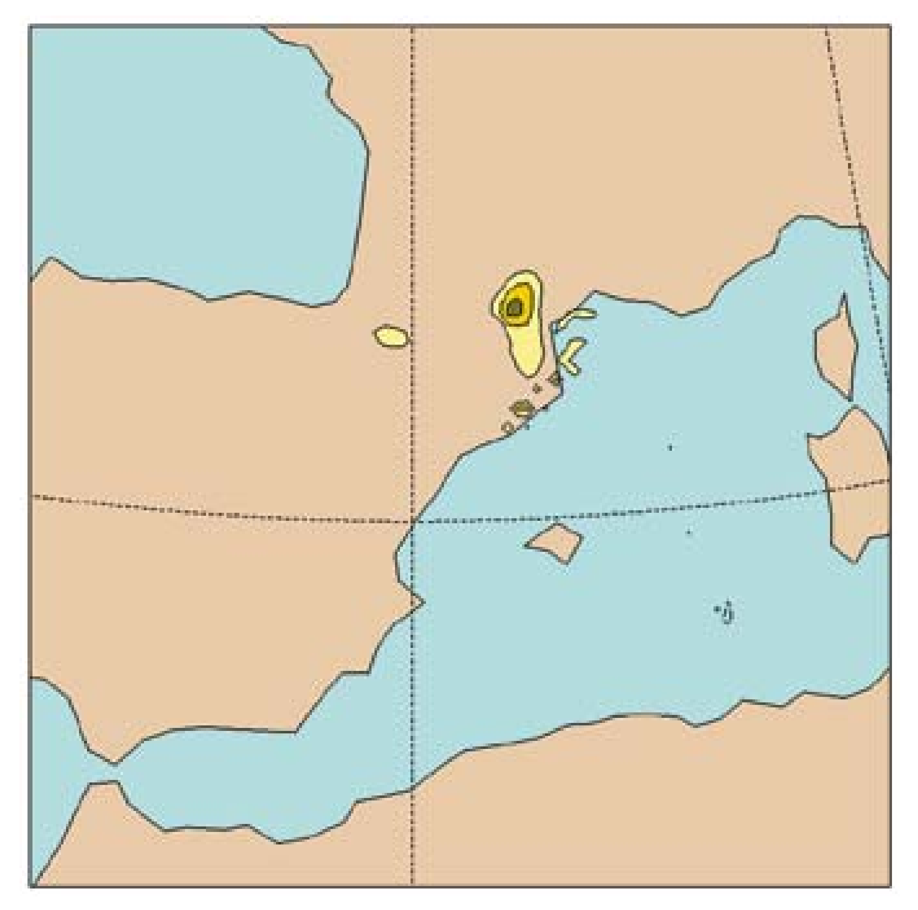
Pero la resolución espacial de los modelos numéricos no es suficiente para tratar las células convectivas una por una; en consecuencia, las cantidades de lluvia dadas por las simulaciones numéricas suelen ser inferiores a las reales.

En la mayoría de las ocasiones, la orografía representa el mecanismo de elevación que necesitan las partículas de aire superficiales para formar las nubes convectivas. En algunas, sin embargo, la orografía sólo desempeña una función secundaria, para dar lugar a una mera redistribución de las precipitaciones.

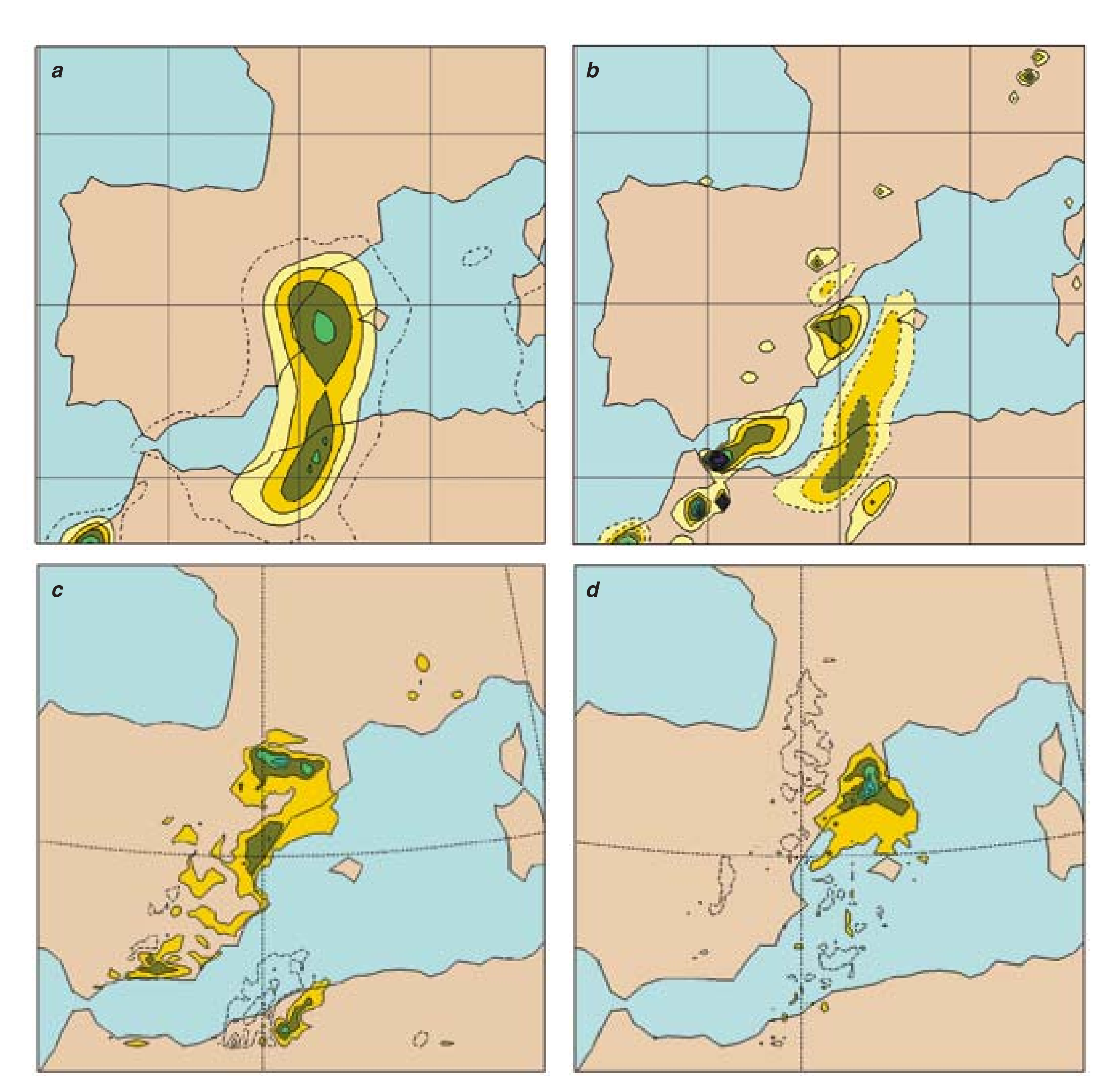
Las simulaciones numéricas ponen también de manifiesto la importancia del efecto de la interacción entre evaporación y orografía, importancia que aumenta al hacerlo la evaporación. Si el aire está ya muy húmedo, admitirá poco vapor adicional y el papel de este efecto será accesorio. Pero si el aire está menos húmedo y la temperatura del mar es alta (circunstancia habitual en el Mediterráneo occidental a finales de verano y en otoño), habrá gran evaporación y, entonces, el aire de las capas bajas, al interaccionar con las montañas cercanas a la costa, desarrollará nubes convectivas que darán precipitaciones intensas.

El modelo conceptual, aunque probablemente represente la mayoría de las situaciones meteorológicas que desencadenan lluvias fuertes en la costa mediterránea española, no es el único que explica los mecanismos que intervienen. Correspondería a los casos en que la dinámica atmosférica a gran escala es débil. En estas circunstancias, el papel de la orografía es fun-





10. PRECIPITACION SIMULADA por el modelo SALSA entre las 12 y las 24 horas del 12 de noviembre de 1988 en el experimento sin orografía. Los colores indican cantidades de precipitación según la escala de la figura 3a. La línea discontinua es la isoyeta de 10 mm (*arriba*). En el mapa inferior, se ilustra el efecto de la orografía sobre el campo de precipitación en la simulación del caso del 12 de noviembre de 1988. Los colores indican una contribución positiva según la escala de la figura 3a. Las líneas discontinuas indican efectos supresores (a partir de 20 milímetros).



11. PRECIPITACION SIMULADA por el modelo HIRLAM para el 28 de septiembre de 1994 en el experimento sin orografía. Los colores indican cantidades de lluvia según la escala de la figura 4b. La línea discontinua es la isoyeta de 5 mm (*a*). Efecto de la orografía sobre el campo de precipitación para el 28 de septiembre de 1994. Los colores indican cantidades de lluvia según la escala de la figura 4b. Las líneas continuas indican contribuciones positivas y las discontinuas efectos supresores (*b*). Efecto sobre el campo de precipitación para el experimento del 10 de octubre de 1994: (*c*) de la orografía, (*d*) de la interacción evaporación-orografía. Las isoyetas continuas representan efectos positivos (a partir de 10 mm con un intervalo de 20 mm). Las líneas discontinuas representan efectos supresores (a partir de 10 mm con un intervalo de 20 mm).

damental. Pero hay otras situaciones en las cuales es la propia atmósfera la que suministra los mecanismos de elevación suficientes para que las partículas de bajos niveles puedan inestabilizarse y desarrollar nubes convectivas. El desarrollo de convección sobre el mar, que posteriormente podría alcanzar tierra firme, estaría ligado a situaciones en las cuales domina este segundo tipo de mecanismos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CLIMATOLOGÍA DE ESPAÑA Y PORTUGAL. I. Font Tullot, Instituto Nacional de Meteorología; 1983.

ASPECTOS ESTADÍSTICOS Y SINÓPTICOS DE LAS PRECIPITACIONES INTENSAS EN CATALUÑA. A. Burgueño, A. Redaño y M. C. Llasat. Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, n.º 875; 1989.

STORMS. W. R. Cotton, en *Geophysical Science Series*, vol. 1, ASTeR Press; 1990.

GEOGRAFIA DE LA POBREZA

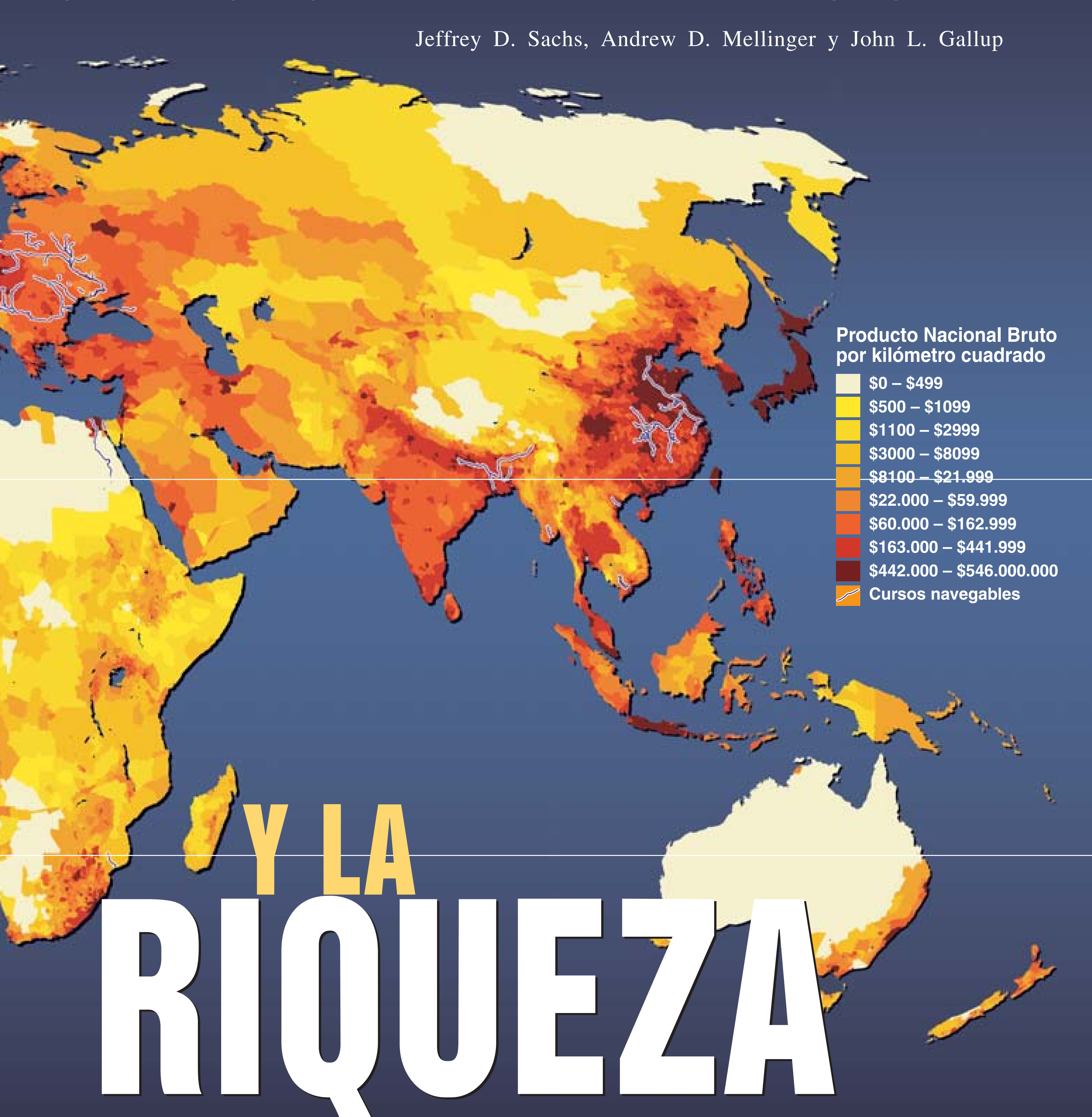
Trópico de Cáncer

Trópico de Capricornio

1. LA DISTRIBUCION GLOBAL de la producción económica se muestra en este mapa mundial de la densidad del PNB, que es la multiplicación de la densidad de población por el producto nacional bruto *per capita*. Tal producción se concentra a lo largo de las costas y cursos navegables de las zonas templadas.

El clima tropical y la falta de acceso al comercio marítimo han perjudicado a las naciones más pobres. Con los nuevos planes de ayuda podría abrírseles el camino hacia la prosperidad

Jeffrey D. Sachs, Andrew D. Mellinger y John L. Gallup



Y LA RIQUEZA

¿Por qué hay países pasmosamente ricos y países hundidos en espantosa pobreza? Esta pregunta les viene intrigando a los sociólogos desde que, en 1776, el economista escocés Adam Smith planteó la cuestión en su obra maestra *La riqueza de las naciones*. Defendía allí Smith que la mejor receta para lograr la prosperidad era una economía de libre mercado, en la que el gobierno dejara amplia libertad para la obtención de beneficios en los negocios. Los dos siglos transcurridos desde entonces han confirmado la hipótesis de Smith con el enorme éxito de las economías capitalistas en Norteamérica, Europa occidental y Este asiático, así como con el lamentable fracaso de la planificación socialista en los países de la órbita soviética.

Pero Smith formulaba una segunda hipótesis notable: la de que la geografía física de una región influía en sus logros económicos. Sostenía que las economías de las regiones costeras, por su fácil acceso al comercio marítimo, prosperaban más que las de las regiones de tierra adentro. Pues bien, aunque hoy la mayoría de los economistas siguen a Smith en el vincular la prosperidad económica al libre mercado, son en cambio propensos a olvidar el influjo de la geografía física; dan por supuesto que todas las partes del mundo cuentan con las mismas posibilidades de crecimiento económico y de desarrollo a largo plazo, y que las diferencias efectivas resultan sólo de diferencias en los regímenes e instituciones. Muy otra cosa sugieren las investigaciones que hemos hecho nosotros basándonos en datos recientes y en nuevos métodos de trabajo. Hemos comprobado que la geografía física desempeña un papel crucial en la distribución de la renta y en el desarrollo mundial de la economía.

Las regiones costeras y las próximas a cursos navegables son mucho más ricas y están más densamente pobladas que las regiones interiores, tal como lo predijera Smith. Además, el clima de una región puede también afectar a su desarrollo económico. Los países de las zonas de clima tropical sufren generalmente mayores tasas de enfermedades infecciosas y tienen menos productividad agrícola (especialmente de alimentos de primera necesidad) que los países de las zonas templadas. Parecidas adversidades pesan sobre las zonas desérticas. En los países más pobres del mundo convergen ambos inconvenientes: lejana o ninguna posibilidad de tráfico marítimo y una ecología tropical o desértica.

Alguien podría objetar que esa conclusión es de manual, archisabida. Le daremos tres respuestas. Primera, que nosotros rebasamos con mucho las nociones básicas, pues calculamos sistemáticamente lo que contribuyen los factores geográficos, económico-políticos y otros varios a la determinación de los logros de un país. Hemos combinado los instrumentos de investigación que utilizan los geógrafos —entre los que se incluyen nuevos programas informáticos capaces de crear detallados mapas de la densidad demográfica del globo— con las técnicas y ecuaciones de la macroeconomía. Afirmaremos, en segundo lugar, que merece la pena repasar las lecciones básicas de la geografía, porque se diría que la mayoría de los economistas las ignoran. Una inmensa proporción de los trabajos que sobre desarrollo económico se han escrito en los últimos diez años han pasado por alto hasta las más obvias realidades geográficas. Y, como tercera respuesta, que si nuestras averiguaciones son certeras, sus implicaciones políticas son importantes. Los programas de ayuda a los países subdesarrollados deberán corregirse con miras a solucionar los problemas impuestos por la geografía. Hemos intentado, sobre todo, formular nuevas estrategias que ayuden a los países de las zonas tropicales a incrementar su productividad agrícola y a reducir la terrible incidencia de malaria y otras enfermedades.

JEFFREY D. SACHS, ANDREW D. MELLINGER y JOHN L. GALLUP han dirigido las investigaciones en que se basa este artículo bajo los auspicios de la Universidad de Harvard en su Centro para el Desarrollo Internacional (CID). Sachs, director del CID, es asesor en cuestiones económicas de países de Europa oriental, Iberoamérica, Africa y Asia. Mellinger se ha especializado en la aplicación multidisciplinar de sistemas de información geográfica. Gallup es fundador de developIT.org, que proporciona gratuitamente apoyo técnico a los usuarios de información técnica y comercio electrónico en los países en vías de desarrollo.

La divisoria geográfica

El mejor indicador de la prosperidad económica de un país es su producto nacional bruto (PNB) *per capita*, o sea, el valor total de su producción económica dividido por el número de sus pobladores. Un mapa de la distribución mundial del PNB *per capita* revela inmediatamente el enorme abismo que separa a los países ricos de los países pobres. Salta a la vista que la gran mayoría de los países más pobres está en la zona tropical, que se extiende entre el trópico de Cáncer y el trópico de Capricornio. En cambio, la mayoría de los países más ricos se hallan en las zonas templadas.

Una imagen más precisa de esta divisoria geográfica puede obtenerse definiendo las regiones tropicales por el clima, no por la latitud. El mapa de la figura 3 divide el mundo en





2. LAS DISPARIDADES ECONOMICAS pueden en parte atribuirse a la geografía. Los países costeros de las zonas templadas, así Alemania (*página contigua*), tienen un transporte más barato y una mayor productividad agrícola que los países tropicales situados en el interior de un continente, como por ejemplo Uganda (*arriba*).

cinco zonas climáticas según un esquema clasificatorio elaborado por Wladimir P. Köppen y Rudolph Geiger. Estas cinco zonas son: la tropical-subtropical (que en adelante llamaremos "tropical"), la de desierto-estepa ("desértica"), la templado-nivosa ("templada"), la de tierras altas y la polar. Defínense tales zonas por medidas de temperatura y de precipitación. Excluimos de nuestros análisis la zona polar.

Entre las 28 economías clasificadas como de alta renta por el Banco Mundial (con poblaciones de al menos un millón) sólo Hong Kong, Singapur y parte de Taiwan se encuentran en la zona tropical, lo que representa un escueto 2 % del total de población de los países de renta alta. Casi todos los países de las zonas templadas tienen o economías de alta renta (Norteamérica, Europa occidental, Corea y Japón) o economías de renta media oprimidas en un pasado reciente por políticas socialistas (Europa del Este, antigua Unión Soviética y China). Hay, además, una marcada divisoria templado-tropical en países situados a caballo de ambos tipos de clima. La mayor parte del Brasil, por ejemplo, se extiende dentro de la zona tropical, pero la porción más rica de la nación —la formada por sus estados sureños— queda en la zona templada.

La importancia del acceso al tráfico marítimo se evidencia también en el mapa mundial del PNB *per capita*. Las regiones situadas lejos del mar, como las naciones encerradas tierra adentro de Sudamérica, Africa y Asia, tienden a ser considerablemente más pobres que sus vecinas que sí tienen salida al mar. Las diferencias entre las regiones costeras y las interiores se notan aún más en un mapa mundial de la densidad del PNB, es decir, del monto de la producción económica por kilómetro cuadrado (*figura 1*). Este mapa está basado en un detenido examen de las densidades de la población mundial en 1994. Los programas informáticos de ordenación sistemática suelen dividir las tierras habitadas del mundo en sectores de 5 × 5 minutos (alrededor de 100 km cuadrados en el ecuador). La densidad del PNB para cada sector puede calcularse multiplicando su densidad de población por su PNB *per capita.* Cuando no se dispone de estimaciones regionales, se utilizan los promedios nacionales del PNB *per capita*.

Para interpretar los datos, hemos clasificado las regiones del mundo en amplias categorías definidas por el clima y la proximidad al mar. Calificamos a una región de "próxima" si está a menos de 100 kilómetros de la costa o de un curso navegable (río, lago o canal por donde puedan circular barcos de gran calado), y si no la calificamos de "lejana". Como las regiones de las cuatro zonas climáticas que hemos analizado pueden ser próximas o lejanas, resulta un total de ocho categorías. El recuadro "La riqueza de las regiones" muestra el reparto de la población mundial, la renta y la extensión del terreno.

El análisis revela diferencias muy llamativas. La producción global se concentra en las regiones costeras de las zonas de clima templado. Las regiones de la categoría "templada y próxima" constituyen un mero 8,4 % del total de la tierra habitada, pero en ellas está el 22,8 % de la población mundial y dan cuenta del 52,9 % del PNB del mundo entero. En esas regiones la renta *per capita* es 2,3 veces mayor que el promedio de la global, y la densidad de población 2,7 veces mayor. En cambio, la categoría "tropical y lejana" es la de más extrema pobreza, con un PNB *per capita* sólo alrededor de un tercio del promedio mundial.

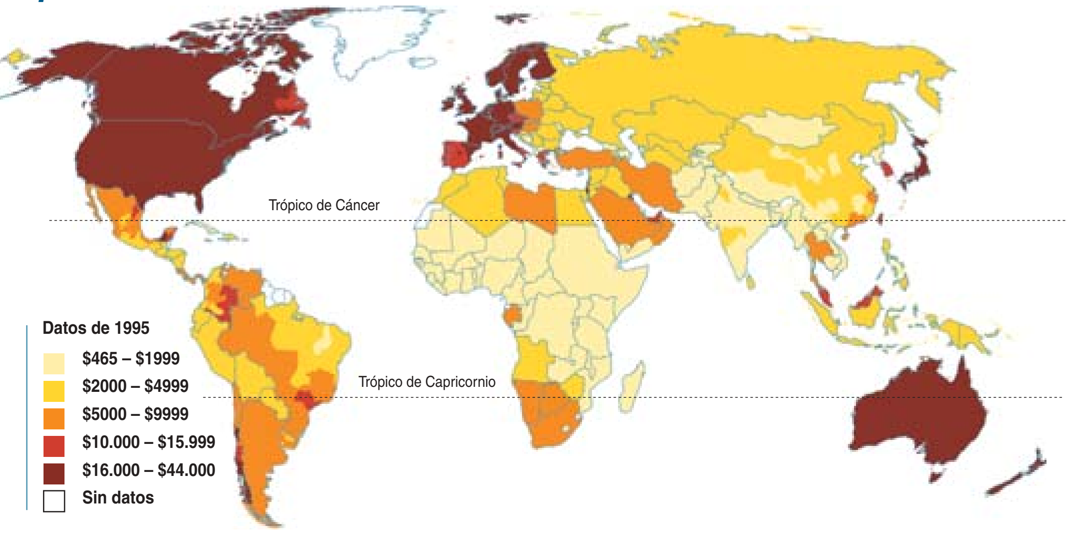
Interpretación de las pautas

En nuestra investigación hemos examinado tres modos principales de afectar la geografía al desarrollo económico. Primero, como lo apuntó Adam Smith, las economías difieren según la facilidad que tengan para transportar bienes, personas e ideas. Siendo el transporte marítimo menos caro que el terrestre o el aéreo, las economías próximas al litoral tienen mucha ventaja sobre las de tierra adentro. En el interior de Africa, por ejemplo, los costes por kilómetro del comercio terrestre son de un orden de magnitud mayores que los del transporte marítimo hasta un puerto africano. Transportar por buque un contenedor de seis metros desde Rotterdam, en Holanda, hasta Dar-es-Salaam, en Tanzania —distantes entre sí 7300 kilómetros— cuesta unos 1400 dólares. En cambio, transportar el mismo contenedor por tierra desde Dar-es-Salaam hasta Kigali, Ruanda —una distancia de 1280 kilómetros—, cuesta alrededor de 2500 dólares, casi el doble.

Segundo modo: la geografía afecta a la frecuencia de las enfermedades. Muchos tipos de morbos infecciosos son endémicos en las zonas tropicales y subtropicales. Esto tiende a suceder con enfermedades cuyos patógenos pasan parte de su ciclo biológico fuera del huésped humano, como son, por ejemplo, la malaria (transmitida por mosquitos) y las infecciones helmínticas (causadas por gusanos parásitos). Aunque epidemias de malaria las hubo esporádicamente en el siglo pasado en lugares tan al norte como Boston, la enfermedad nunca se ha asentado durante mucho tiempo en las zonas templadas, porque ahí los fríos invernales controlan la propagación de los mosquitos transmisores. (Podría considerarse la intervención del invierno como el más eficiente auxiliar de la salud pública mundial.) Es mucho más difícil controlar la malaria en las regiones tropicales, donde la transmisión se produce en todas

PNB *per capita*

3. RIQUEZA Y CLIMA se hallan inextricablemente unidos. Comparando los mapamundis que muestran el PNB *per capita* (*aquí al lado*) y las zonas climáticas (*página contigua*), se ve que los países situados en las zonas templadas son en general mucho más prósperos que los de la zona tropical. Y en cada zona climática, las regiones próximas a las costas marítimas y a las vías navegables son más ricas que las de tierra adentro (*tabla de abajo*).



las estaciones del año y afecta a gran parte de la población.

Según la Organización Mundial de la Salud, se dan cada año de 300 a 500 millones de nuevos casos de malaria, concentrados casi todos ellos en los trópicos. La enfermedad es tan común en esas zonas que nadie sabe en realidad a cuántas personas mata anualmente, a un millón, por lo menos, y quizás hasta a 2,3 millones. La difusión de la enfermedad y el gran número de muertes prematuras obstaculizan enormemente el progreso económico de una nación, pues reducen la productividad laboral. Pero hay también efectos a largo plazo que, a través de diversas reacciones sociales, pueden con el tiempo deteriorar más aún su economía.

Por ejemplo, una fuerte incidencia de la enfermedad puede alterar la estructura demográfica de un país. Las sociedades con altos niveles de mortalidad infantil tienden a tener altos niveles de fertilidad: las madres procuran engendrar muchos hijos para asegurarse de que al menos algunos sobrevivirán hasta la madurez. De ahí que los niños constituyan una gran proporción de la población. Pero con tantos niños las familias pobres no pueden gastar mucho en la educación de cada uno. Y la alta fertilidad limita también las funciones sociales de la mujer, porque la crianza de los hijos ocupa mucho tiempo de su vida adulta.

Tercer modo: la geografía afecta a la productividad agrícola. De los principales cereales de la dieta —trigo, maíz y arroz—, el primero sólo se produce en los climas templados, y las cosechas de maíz y de arroz abundan más en los climas templados y en los subtropicales que en las zonas tropicales. En los trópicos, un campo de una hectárea da un promedio de 2,3 toneladas métricas de maíz, mientras que en la zona templada una hectárea produce 6,4 toneladas. En las pluviselvas tropicales la fragilidad del suelo dificulta mucho el cultivo: el calor mineraliza las materias orgánicas y las lluvias torrenciales las lixivian del mantillo. En los ambientes tropicales donde alternan estaciones húmedas y secas —como ocurre en la sabana africana— los agricultores han de luchar contra la rápida pérdida de la humedad del suelo por culpa de las altas temperaturas, la gran variabilidad de las precipitaciones y el constante riesgo de sequía. Añádase que las zonas tropicales sufren el azote de plagas de insectos y de parásitos capaces de devastar cosechas y ganados.

Muchos de los esfuerzos por aumentar la producción de alimentos en los trópicos —esfuerzos realizados primero por las potencias coloniales y después, en décadas recientes, por organizaciones sin ánimo de lucro— han terminado en fracasos. Por lo común, los expertos en agricultura trataban de trasladar simplemente a los trópicos prácticas de cultivo propias de la zona templada, con lo que sólo conseguían ver cómo los ganados y las cosechas sucumbían a pestes, enfermedades y barreras climáticas. Lo que complica más aún el problema es que en las regiones tropicales hay que contar con factores geológicos y topográficos muy distintos de unos lugares a otros, que condicionan el rendimiento de las cosechas. La isla de Java, por ejemplo, puede soportar cultivos muy productivos porque allí el terreno volcánico sufre menos escasez de nutrientes que las tierras no volcánicas de las vecinas islas de Indonesia.

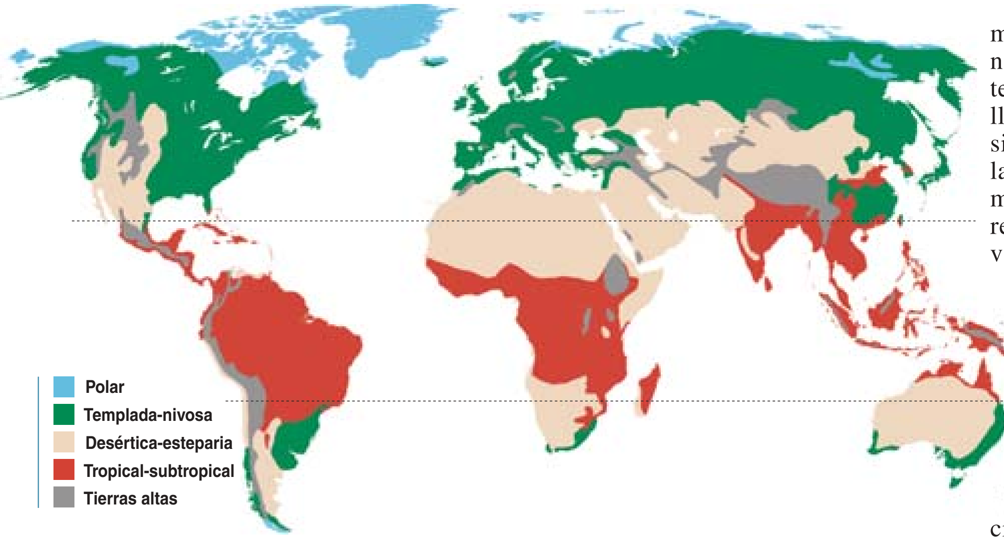
Pequeñas ventajas o desventajas geográficas pueden dar lugar a grandes diferencias en los logros económicos a largo plazo. Por ejemplo, las condiciones favorables para la agricultura o para la salud pública pueden hacer que aumente la renta *per capita* en las naciones de la zona templada y de ahí que crezcan sus economías. Este crecimiento anima a los inventores de esas naciones a crear productos y servicios que vender en los mayores y más ricos mercados. Los inventos resultantes van elevando el rendimiento económico, lo que a su vez estimula la actividad creadora. La pequeña ventaja geográfica se multiplica con la innovación.

La riqueza de las regiones

Zona climática (% del total mundial)		Cerca*	Lejos*
Tropical			
Superficie territorial	19,9%	5,5%	14,4%
Población	40,3%	21,8%	18,5%
PNB	17,4%	10,5%	6,9%
Desértica			
Superficie territorial	29,6%	3,0%	26,6%
Población	18,0%	4,4%	13,6%
PNB	10,1%	3,2%	6,8%
Tierras Altas			
Superficie territorial	7,3%	0,4%	6,9%
Población	6,8%	0,9%	5,9%
PNB	5,3%	0,9%	4,4%
Templada			
Superficie territorial	39,2%	8,4%	30,9%
Población	34,9%	22,8%	12,1%
PNB	67,2%	52,9%	14,3%

* "Cerca" significa a menos de 100 km de la costa o de una ruta navegable; "lejos" se refiere al resto.

Zonas climáticas



Por contra, la baja producción de alimentos por cada trabajador agrícola en las regiones tropicales tiende a encoger el tamaño de las ciudades, que para su sustento dependen de la agricultura del país. Y al ser cada vez menor la proporción de habitantes en las zonas urbanas, la tecnificación progresa con lentitud. Eso explica el que las regiones de los trópicos sigan siendo más rurales que las de las zonas templadas, por concentrarse la mayor parte de su actividad económica en una agricultura apenas mecanizada, no en fábricas y servicios de técnica avanzada.

Debemos recalcar, sin embargo, que los factores geográficos constituyen sólo una parte del cuadro. Las instituciones sociales y económicas revisten una importancia decisiva para los logros económicos a largo plazo. Resulta muy instructivo comparar el éxito del libre mercado posterior a la Segunda Guerra Mundial con el fracaso de las economías socialistas en países vecinos y que comparten las mismas características geográficas: Corea del Norte y Corea del Sur, Alemania Oriental y Alemania Occidental, la República Checa y Austria, Estonia y Finlandia. En todos estos casos las instituciones del mercado libre dieron mucho mejores resultados que las socialistas.

La principal conclusión que se deduce de nuestras averiguaciones es que los dirigentes políticos deberán prestar más atención a las barreras que la geografía opone al desarrollo, en particular las levantadas por la deficiente sanidad, la baja productividad agrícola y los elevados costos del transporte. Así, las economías tropicales deberán esforzarse por diversificar la producción orientándola hacia sectores de manufacturas y de servicios en los que la climatología no constituya un impedimento. En los prósperos países tropicales del sudeste asiático, sobre todo Malasia, se han registrado asombrosos progresos en los últimos 30 años, en parte resolviendo sus problemas de salud pública y en parte cambiando de una economía basada en la exportación de productos dependientes del clima (caucho, aceite de palma, etc.) a otra fundada en la electrónica, los semiconductores y sectores industriales diversos. Les ayudaron para ello su alta concentración demográfica en zonas costeras próximas a las grandes rutas comerciales marítimas y también unas condiciones relativamente favorables para el control de la malaria y de otras enfermedades tropicales. El Africa sub-sahariana no tiene tanta suerte: la mayor parte de su población se halla lejos de las costas y sus condiciones ecológicas son mucho más duras para la salud humana y para los cultivos.

El Banco Mundial y el Fondo Monetario Internacional, los dos organismos que más influyen en el asesoramiento a países en desarrollo, ponen más énfasis en las reformas institucionales —revisando, por ejemplo, la administración pública de una nación o el funcionamiento de su sistema fiscal— que en las técnicas necesarias para luchar contra las enfermedades tropicales y contra la baja productividad agrícola. Un obstáculo enorme es que la industria farmacéutica no encuentra ningún incentivo de mercado para hacer frente a los problemas sanitarios de los pobres del mundo. Por consiguiente, las naciones más ricas deberán adoptar medidas que motiven a los laboratorios a elaborar vacunas contra las enfermedades tropicales. Por nuestro lado hemos insistido ante los gobiernos de naciones ricas pidiéndoles que fomenten las investigaciones y el desarrollo de vacunas contra la malaria, el sida y la tuberculosis, de manera que las compañías farmacéuticas las suministren a un precio razonable. Paralelamente, a las empresas de investigación biotecnológica y agrícola se las ha de incentivar para que estudien cómo incrementar la producción agrícola en las regiones tropicales.

Los países más pobres del mundo carecen de recursos para librarse por sí solos de la carga con que su propia geografía los oprime. Las naciones del Africa sub-sahariana tienen niveles de renta *per capita* de alrededor de 1 dólar diario. Aun cuando inviertan en salud pública hasta el 3 o el 4 % de su PNB —proporción muy grande de la renta nacional para una país muy pobre—, el resultado no pasa de ser tan sólo de unos 10 a 15 dólares anuales por persona. Lo cual evidentemente no da de sí para controlar la endémica malaria, y mucho menos para luchar contra la difusión de otros graves morbos como son el sida, la tuberculosis y las infecciones helmínticas.

Un serio esfuerzo por el desarrollo global requerirá no sólo políticas económicas más acertadas en los países pobres, sino también mayor apoyo financiero de los países ricos, que ayude a superar los inconvenientes que impone la geografía. De acuerdo con cálculos provisionales, bastaría un modesto aumento de 25.000 millones de dólares al año en la financiación gratuita —lo que es sólo el 0,1 % del PNB total de las naciones ricas, o alrededor de 28 dólares por persona— para promover un enorme avance en la reducción de las enfermedades y en el incremento de la productividad alimentaria de los países más pobres del planeta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AN INQUIRY INTO THE NATURE AND CAUSES OF THE WEALTH OF NATIONS. Adam Smith. Reprint. Modern Library, 1994.

GUNS, GERMS, AND STEEL: THE FATES OF HUMAN SOCIETIES. Jared Diamond. W. W. Norton, 1997.

THE WEALTH AND POVERTY OF NATIONS: WHY SOME ARE SO RICH AND SOME SO POOR. David S. Landes. W. W. Norton, 1998.

Integración de los bárbaros en la sociedad galo-romana

Contrariamente a la creencia popular, los hunos y otros bárbaros venidos de Oriente no eran sólo unas hordas sanguinarias. Mercenarios a sueldo de Roma, algunos se integraron en la sociedad galo-romana

Michel Kazanski y Christian Pilet

“Los hunos, que según ciertas noticias venían de las Panonias, llegan la víspera misma de la Santa Pascua ante la ciudad de Metz, devastando el resto del país; incendian la ciudad, pasan a cuchillo a sus habitantes y asesinan incluso a los sacerdotes del Señor ante los sagrados altares.”

Gregorio de Tours, *Historia de los Francos*, Libro II, VI.

Los bárbaros, los vándalos, Atila, nombres que evocan una brutalidad sin límites. ¿No eran acaso los pueblos bárbaros hordas de guerreros sanguinarios e implacables? Pues bien, en estas páginas vamos a intentar hacer ver que no todos lo fueron, y expondremos las razones que nos inclinan a pensar que algunos de aquellos bárbaros venidos de Oriente se integraron en la sociedad galo-romana, utilizando y hasta imitando sus monedas. El mobiliario funerario de las tumbas que hemos excavado revela que los bárbaros que se establecieron en la Galia conservaban sus costumbres, pero también adoptaban muchas modas y objetos romanos. A su vez, en las necrópolis romanas de la misma época se hallan numerosos objetos de origen bárbaro. Hubo, pues, intercambios “pacíficos” entre ciertos bárbaros y la población galo-romana.

MICHEL KAZANSKI y CHRISTIAN PILET se hallan adscritos al Centro Nacional de Investigaciones Científicas francés. El primero trabaja en el Museo Nacional de Antigüedades en Saint-Germain-en-Laye, Pilet en la Universidad de Caen.

Los hunos, jinetes nómadas procedentes del Asia central, llegan por el año 375 a las estepas del sur de Rusia. Prosiguiendo su avance hacia el oeste, expulsan de sus tierras a otros pueblos bárbaros ya asentados allí, tales como los germánicos godos, que se dividen en dos grupos, visigodos y ostrogodos.

A comienzos del siglo V, los hunos invaden la región de los Cárpatos y de la Panonia, aproximadamente la Hungría actual; someten a todos sus habitantes y se instalan allí, conservando costumbres de la vida nómada (por ejemplo, sus poblados no son sino conjuntos de tiendas de campaña); y continúan su incontenible avance hacia Occidente. Llegados a las puertas del Imperio romano, intentan varias incursiones. A sus hordas se les juntan otras tribus (burgundios, vándalos, etc.) y sus multitudes son una amenaza grave para el Imperio de Roma. Las grandes migraciones de finales de la Antigüedad y comienzos de la alta Edad Media, entre los siglos IV y VI, se terminan, en Occidente, hacia el año 568, al establecerse en Italia los lombardos.

Lo que impulsa a los nómadas a desplazarse son las inclemencias climáticas de sus territorios, lo precario de sus economías y el continuo aumento de su población, que les fuerza a conquistar nuevas tierras. La mayor parte de los bárbaros que se desplazan durante el período de las Grandes Migraciones no son unos recién llegados a Europa. Germanos de la Europa central y septentrional, iranios (alanos y sármatas) de las estepas del mar Negro, eslavos de los bosques de la Europa oriental, celtas de las islas Británicas: todos ellos están ya bien instalados en tierras de Europa desde la Edad de Hierro y en la época romana.

Un complejo juego de alianzas, tratados y dominaciones por la fuerza reúne en torno a Atila a numerosas tribus de diferentes orígenes. La federación de los hunos se convierte en una superpotencia. Los nómadas jinetes hunos se hacen terriblemente famosos por sus históricos éxitos militares. A comienzos del siglo V llaman ya a las puertas del Imperio romano, muy conocidos y temidos por los representantes de la autoridad imperial. Sus múltiples contactos favo-

1. LAS GRANDES INVASIONES comienzan en el año 375, cuando los hunos venidos de Extremo Oriente llegan a los confines de Europa. En su avance hacia el oeste se encuentran primero con los alanos y después con los godos; estos últimos, expulsados de sus tierras por los hunos, se dividen en dos grupos, visigodos y ostrogodos. Los hunos se establecen en la Panonia, la actual Hungría. Aliándose a otros pueblos bárbaros, emprenden varias expediciones contra el Imperio romano, pero serán rechazados definitivamente tras su derrota en los campos Cataláunicos, cerca de Troyes, en el 451. Los objetos que se hallan a lo largo de su ruta, especialmente en las sepulturas, testimonian la difusión de la cultura bárbara por toda la cuenca del Danubio. Se han hallado numerosas placas metálicas de las que decoraban sus sillas de montar (*mapa a*), trozos de los típicos zarcillos que pendían de las orejas de los guerreros (*mapa b*) y fíbulas de las que se servían para abrocharse la vestimenta (*mapa c*).

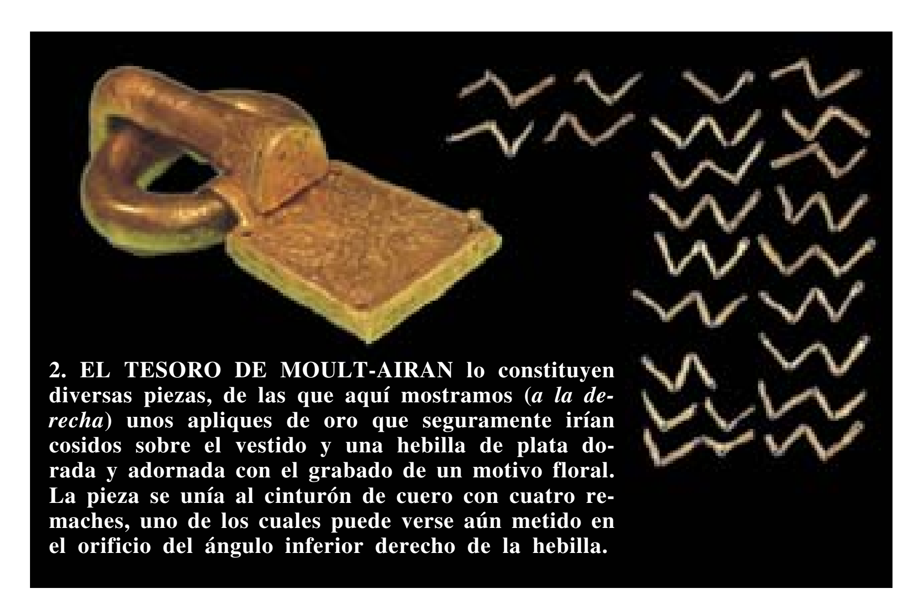


recen los intercambios culturales, que se concretan en la formación de uniones tribales y alianzas de finalidad militar entre romanos, alamanes, godos, francos, hunos, etc. A mediados del siglo V, al emperador romano Valentiniano III le es difícil reclutar tropas dentro de sus propias fronteras. Es entre las abigarradas poblaciones bárbaras que rondan junto a los límites del Imperio donde las autoridades militares romanas han de reclutar sus soldados.

Bárbaros mercenarios

Durante la primera fase del movimiento migratorio, que es la que aquí más nos interesa, los hunos, los germanos orientales (godos, burgundios, etcétera), los francos y los alanos ocupan el primer plano de la escena.

Emigran a millares desde la Panonia, marchando los hombres a caballo, las mujeres y los niños en carros. Ciérranse diversos tratados entre las autoridades imperiales y los bárbaros: los romanos cohabitan con los recién llegados. Es una migración pacífica, aunque algunos tratados se rompan a veces y las alianzas sean a menudo fugaces.



2. EL TESORO DE MOULT-AIRAN lo constituyen diversas piezas, de las que aquí mostramos (*a la derecha*) unos apliques de oro que seguramente irían cosidos sobre el vestido y una hebilla de plata dorada y adornada con el grabado de un motivo floral. La pieza se unía al cinturón de cuero con cuatro remaches, uno de los cuales puede verse aún metido en el orificio del ángulo inferior derecho de la hebilla.

Los hunos entran al servicio del Imperio hacia el 384; en el año 409, el ejército de Honorio tiene en sus filas 10.000 hunos mercenarios. Tras un nuevo tratado, Aecio, jefe militar de la Galia, hace venir, entre el 425 y el 429, a varios miles de jinetes hunos. A los mercenarios se les contrata para una campaña, y, una vez cumplida su misión militar, parten de nuevo hacia el este. Sin embargo, parece ser que algunos se quedan en la Galia y se integran en el sistema de vida romano. Los que terminan su carrera en el ejército imperial pasan a ser automáticamente ciudadanos romanos y reciben en propiedad tierras de labor.

De este modo, durante la segunda mitad del siglo IV y la primera mitad del V, el ejército romano se compone en gran parte de bárbaros, habiéndolos inclusive entre la alta oficialidad. Los jefes militares fundan dinastías, y esta organización preestatal anuncia la constitución de los reinos bárbaros de comienzos de la Edad Media. En cambio, las poblaciones bárbaras más alejadas de las fronteras del Imperio, como los eslavos o los germanos del norte, conservan durante más tiempo sus estructuras de caudillajes. La transformación en reinos sólo se producirá en el momento en que esos pueblos emigren por el territorio del Imperio, entre los siglos V y VII; es el caso de los sajones, los anglos, los jutos en la isla de Britania, o también el de los esclavenos en los Balcanes.

A partir del 430, son numerosos los hunos mercenarios que se establecen en la Galia. Mandados por Aecio, el futuro vencedor de Atila, se baten lealmente contra otros bárbaros: burgundios, visigodos, francos. Los hunos, excelentes arqueros, mantienen todavía su reputación cuando, en el siglo VI, luchan en el ejército bizantino contra vándalos y ostrogodos.

Esta paz armada entre los hunos y los romanos no dura mucho tiempo. Atila, atraído por las riquezas del Imperio romano de Occidente, decide atacar, en 451-452. Del lado de los hunos reúne a varios pueblos sometidos: ostrogodos, gépidos, rugos, esquiros, turingios, francos renanos y burgundios de allende el Rhin. Atravesado el río, el ejército bárbaro se apodera de Metz y marcha luego sobre Orleans. Frente a él, el ejército romano, mandado por Aecio, cuenta en sus filas con algunos contingentes de armoricanos, riparíolos procedentes de los acantonamientos del Rhin, sármatas y federados visigodos, alanos, francos, burgundios y sajones. La batalla se libra, el 20 de junio del 451, en los campos Cataláunicos, cerca de Troyes, y la victoria de las tropas de Aecio pone fin a la invasión de Atila. Este se repliega, pero, en 452, reemprende por el valle del Po unas operaciones militares cuyos inciertos resultados le inducen a pactar una tregua con el emperador de Occidente. La terrible amenaza de los hunos se acaba al morir súbitamente Atila, en 453.

Atila, al final de su vida, después de haber tenido muchas esposas según la costumbre de su nación, se desposó con una bellísima joven llamada Ídlico. En la fiesta de su boda se entregó a todos los placeres. Al final del siguiente día, cuando los servidores del rey, llenos de siniestros presentimientos tras haberle llamado a grandes gritos, forzaron la puerta de su cámara, encontraron a Atila ahogado por su sangre, sin herida alguna...

Jordanes, *Getica*, XLIX

No teniendo ninguno de los hijos de Atila la autoridad federativa del difunto caudillo, el Imperio de los hunos se deshace. Los textos del obispo Gregorio de Tours, los del monje Jordanes y los del embajador romano Prisco relatan los acontecimientos que se produjeron a mediados del siglo V: describen las grandes invasiones bárbaras, las alianzas militares, los tratados, los modos de vida de aquellos pueblos. Junto a esos textos, los restos arqueológicos consti-

3. COLLAR, ANILLOS Y APLIQUES DE ORO que decorarían alguna pieza de vestir, descubiertos en Hochfelden, cerca de Estrasburgo, en una tumba “principesca”, probablemente de la familia de algún alto dignatario militar bárbaro al servicio del emperador de Roma.

tuyen otra fuente de informaciones sobre la época.

El arqueólogo alemán Joachim Werner fue el primero que emprendió, en 1956, la tarea de identificar e inventariar muchos objetos de los hunos que se han ido descubriendo en la parte occidental del Imperio. Sus trabajos han puesto en claro que, aunque los hunos a sueldo del emperador conservaban muchas de sus tradiciones culturales, sobre todo las indumentarias, formaban, sin embargo, parte integrante de la sociedad galorromana.

Vestigios de los hunos

Las necrópolis proporcionan datos esenciales para estudiar hoy las grandes migraciones de los pueblos bárbaros. La excavación de una sepultura permite a los arqueólogos y a los historiadores percatarse de cómo evolucionó un pueblo, descubrir cuáles eran las actividades de sus hombres y mujeres e incluso, a veces, comprender su mentalidad. Los especialistas examinan el emplazamiento de la sepultura, su contenido, la posición de los restos, etc. El estudio antropológico que sigue al descubrimiento de unos restos humanos lo condicionan la calidad de la observación y la de las deducciones pertinentes. Sólo el análisis de todos los indicios puede aportar informaciones fiables, pero son raras las ocasiones en que puede llegarse a identificar el origen geográfico de los individuos cuyos despojos se examina.

Restos y vestigios de los hunos se han encontrado en la Panonia y en las riberas del Rhin y del Danubio, y, en la Galia, todo a lo largo de los caminos frecuentados durante las migraciones. En algunas sepulturas descubiertas en el territorio de la Francia actual, se han recuperado diversos objetos que atestiguan la cultura de los hunos. En Mundolsheim, cerca de Estrasburgo, la tumba de un jinete, identificada por unos adornos de silla de montar en forma de escamas hechas con láminas de plata dorada sobre hierro, por una anilla de plata de las riendas de un caballo, por un herrete de plata y dos pasacorreas de oro, indica que aquel militar de alto rango era de origen oriental. Recientemente se han encontrado otros adornos de silla de montar del mismo tipo que los de Mundolsheim, lo que prueba que diversas poblaciones de la Rusia meridional, de la zona al norte del Cáucaso, de Crimea y del Danubio medio marcharon hacia el oeste durante la dominación de los hunos, entre los años 375 y 453.

En el curso del Danubio y hasta en la Galia vienen hallándose otros muchos objetos típicos de la cultura de los hunos. El descubrimiento, en varias necrópolis, de zarcillos en forma de cuarto creciente prueba que los hunos o las poblaciones a las que dominaron transmitían la moda y la cultura de aquéllos. Tales pendientes son a menudo de plata. Werner ha catalogado 17 yacimientos, tardoantiguos o de la alta Edad Media y repartidos entre el Kazajstán occidental y la Borgoña, que contenían ese tipo de zarcillos. Después se han encontrado objetos similares en muchos otros yacimientos, como en Saint-Martin-de-Fontenay, en los Calvados; más al oeste, en Francia, nosotros no hemos hallado zarcillos como ésos.

Tales pendientes provienen de la Europa oriental, más en concreto del sur de Rusia (regiones del Volga inferior, Cáucaso y Crimea); fueron importados en la época de las grandes migraciones por tribus nómadas. Pero los zarcillos en luna creciente, hallados en la parte más occidental del Imperio, datan de un período posterior a la época del predominio de los hunos, es decir, posterior al período de actividad de los bárbaros orientales. Añádase que los descubiertos en la Galia estaban en lugares donde la población indígena no trabó contacto directo con los hunos. Por este tipo de indicios se puede evaluar la importancia de los contactos entre el este y el oeste, durante la Antigüedad tardía y comienzos de la Edad Media, así como la influencia cultural y pacífica que ejerció la aristocracia militar del barbarizado ejército romano.





4. PIEZAS DE ORO (*cuadro superior*) descubiertas en la tumba bárbara de Loutchistoe, en Crimea. Debidamente conjuntadas forman una preciosa diadema (*abajo*), reconstruida por Elzara Khairedinova, del Instituto de Estudios Orientales de Simféropol (Crimea). La "princesa" de Loutchistoe se engalanaba también con los pendientes que se ven bajo la diadema.



5. **HEBILLAS DE CINTURON de origen romano (*arriba*) las solían usar los mercenarios bárbaros que estaban a sueldo de Roma. Algunos soldados llevaban también pendientes de forma anular o de cuarto creciente (*a la derecha*), típicos de la moda danubiana. Se han recuperado zarcillos o pendientes como éstos en las tumbas de soldados bárbaros enterrados en la Galia y también en las de varias poblaciones indígenas, lo que prueba que las culturas bárbara y romana se entremezclaron.**

La moda danubiana

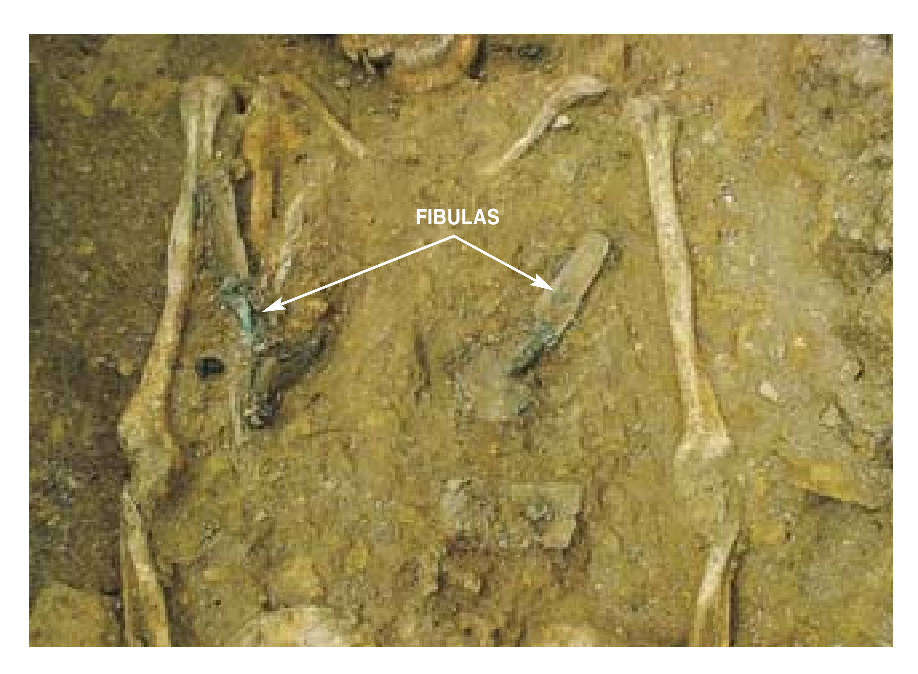
De hecho, aquellos dignatarios transmitieron la "moda danubiana" que se implantó en Occidente e influyó en las poblaciones locales. En Occidente, los zarcillos en forma de creciente lunar aparecen sólo en tumbas de varones. Eran, verosímilmente, parte de una moda militar que prueba la supervivencia de tradiciones bárbaras. Varios autores tardoantiguos señalan la persistencia de tales tradiciones en la Galia merovingia. Según Procopio de Cesarea, en tiempos de Clodoveo unidades enteras del antiguo ejército romano fueron incorporadas al sistema militar del reino merovingio y, todavía en el siglo VI, conservaban uniformes y estandartes.

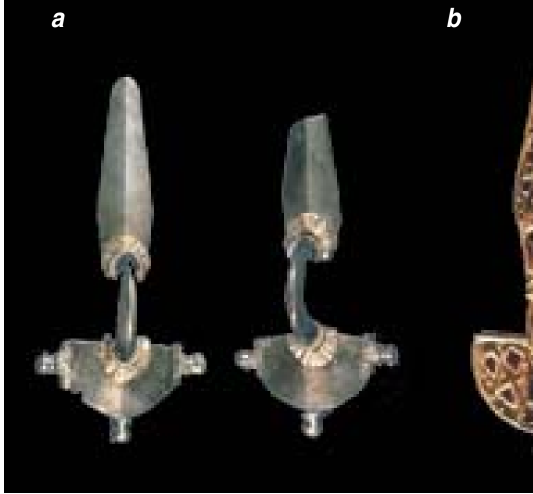
¿En qué consistía aquella moda danubiana que se desarrolló desde finales del siglo IV hasta mediados del V entre las poblaciones dominadas por los hunos o en contacto con ellos? Puede adivinársela gracias a los vestigios hallados en las tumbas de hombres y mujeres que pertenecieron a la aristocracia militar.

Trátase de sillas de montar decoradas con placas metálicas, de adornos de oro cosidos sobre la indumentaria y de espejos metálicos. Otros aspectos de aquella moda nos los revelan diversos objetos de origen germánico oriental, como las fíbulas ansadas con cabeza semicircular y pie romboidal (una fíbula es una especie de hebilla o presilla para sujetar la vestimenta) o los collares con colgantes en forma de hacha.

Inversamente, muchos objetos son de origen romano. Comprenden polícromas guarniciones de espadas y de tahalíes, yelmos a bandas metálicas, broches-insignias de dignatarios, fíbulas en forma de abeja. La moda danubiana, adoptada por numerosos pueblos, tiene un carácter internacional que hace muy difícil, casi imposible, discernir a qué pueblo pertenecieron los individuos inhumados en las tumbas donde se recuperaron los referidos objetos.

Todas estas sepulturas "principescas", dentro del territorio del Imperio, están situadas en las zonas fronterizas o de los *limes*. Así, los yacimientos de Atlusheim, de Wolfsheim y de Hochfelden se hallan cerca





6. **LAS FIBULAS (de *a* a *e*) son características de la moda danubiana. En la tumba de Saint-Martin-de-Fontenay se han hallado dos fíbulas (*a la izquierda*). Las de Hochfelden (*a*),**

de la frontera renana; Moult, en la zona de defensa de las costas de la Mancha contra los piratas sajones y francos. Estas tumbas eran de caudillos militares bárbaros que, procedentes de la Europa central y oriental, se habían puesto al servicio del Imperio romano (así las de Atlusheim, Wolfsheim, Mundolsheim) o de esposas de caudillos (como en Moult y en Hochfelden).

Las sepulturas de mujeres ilustran la diversidad cultural de una aristocracia militar que se desplazaba según lo iban exigiendo los planes estratégicos elaborados por el poder imperial.

La princesa de Moult

La sepultura de la princesa de Moult se descubrió en 1874. Conocida por "Tesoro de Airán", guardaba las joyas con que se engalanaba una joven, que murió a una edad entre los 20 y los 40 años, a comienzos del siglo V. No se sabe cómo estarían dispuestos los objetos sobre el cadáver, porque el excavador se contentó con recuperarlos destrozando el esqueleto. Llevaba la princesa un par de fíbulas de oro y plata con incrustaciones de granates y abalorios (características del estilo polícromo), unidas por una cadena de plata. El conjunto indica una cultura germánica oriental, de moda entre los germanos desde la época tardorromana. Sobre su vestimenta estuvieron cosidos unos adornos geométricos de placas de oro. Estos elementos atestiguan una moda de origen alano-sármata.

En 1995, trabajando con el equipo ucraniano de Alexandre Aibabine, encontramos nosotros un aderezo parecido en una sepultura de mujer que excavamos en Loutchistoe, Crimea. En este caso, las placas de adorno están cosidas sobre una banda, a ambos lados de una pieza circular con decoración alveolada, formando el conjunto una suerte de diadema. La joven de Moult tuvo un pendiente con colgante trilobado y de oro, idéntico al par que hallamos en la tumba de Loutchistoe. Llevaba en el cinturón una placa rectangular de plata dorada y nielada, de influencia cultural romana. (El niel es un sulfuro de plata y plomo que, rellenando con su tono oscuro las incisiones de los motivos grabados, hace que éstos resalten más.)

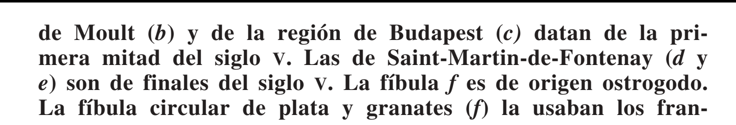
Completa el aderezo una cadena metálica de trencilla de oro. Ignórase el origen cultural de este tipo de objeto, pues se le encuentra entre los germanos, en el territorio del Imperio romano, en Oriente Medio y en Transcaucasia. ¿De dónde vino exactamente la princesa de Moult? Quizá no se averigüe nunca, por más que la forma de adornarse la joven revele influjos romanos, germánicos y alano-sármatas, señales de la difusión más occidental de la moda danubiana.

La Dama de Hochfelden

La sepultura principesca de Hochfelden, descubierta en 1964, es la de una mujer de más edad (entre los 50 y los 70 años). Se sabe que formaba parte de la primera generación de emigrantes, porque presenta indicios de la vida nómada que llevó antes de establecerse en Hochfelden.

Fue enterrada con objetos contemporáneos de los descubiertos en Moult. Las fíbulas ansadas de cabeza semicircular y pie romboidal de plata reflejan una moda germánica oriental; el roto espejo de bronce y las placas ornamentales de oro cosidas sobre sus vestes confirman la influencia alano-sármata; el par de pendientes con colgantes poliédricos de oro acusan un influjo romano, y el collar es de tradición helenística. Esta mujer,





de Moult (*b*) y de la región de Budapest (*c*) datan de la primera mitad del siglo V. Las de Saint-Martin-de-Fontenay (*d* y *e*) son de finales del siglo V. La fíbula *f* es de origen ostrogodo. La fíbula circular de plata y granates (*f*) la usaban los francos, que difundieron una nueva moda. La mujer germánica oriental de comienzos del siglo V, imaginada aquí según los restos de una tumba de Smolin, en la República Checa, lleva un par de fíbulas en los hombros y otra en la base del cuello.





7. ENTRE EL MOBILIARIO de la tumba de Mundolsheim se hallaron unos apliques de oro que decoraban una silla de montar que ha sido reconstruida (*a la izquierda*) y dos anillas pasacorreas de oro (*arriba*).

de alto rango, llevaba una fíbula sobre cada hombro.

El estudio antropológico ha proporcionado interesantes datos complementarios sobre su modo de vida. La Dama de Hochfelden padecía una infección rino-sinusítica, una desviación del tabique nasal y una inflamación de los tendones de los músculos glúteos y aductores. Pertenecía, sin duda, a un grupo de población nómada de origen oriental. Sus molestias rinológicas serían seguramente una consecuencia de su vida nómada, de la incesante exposición a la cruda intemperie y al ambiente lleno de humo de las tiendas de campaña.

También, la práctica cotidiana del montar a caballo explicaría sus tendinitis, que suelen afectar a cuantos frecuentan mucho la equitación. El asiento abrupto y anguloso de la silla de montar de Mundolsheim debió de exigir un excesivo ejercicio de la musculatura glútea y aductora durante largos recorridos. El antropólogo Joël Blondiaux ha comprobado que a los jinetes profesionales de la Escuela de equitación de Saumur el continuo montar a caballo les deforma los ligamentos de los tendones. Así pues, los estudios antropológicos completan las informaciones que proporcionan los objetos hallados en las sepulturas e informan al arqueólogo sobre el origen de los personajes allí enterrados.

Los últimos vestigios de bárbaros orientales en la Galia se han encontrado en las necrópolis merovingias de la segunda mitad del siglo V, concretamente en Pouan, del departamento del Aube, en Saint-Martin-de-Fontenay, del de los Calvados, y en Arcy-Sainte-Restitute, del de Aisne. Trátase de tumbas de hombres y de mujeres en las que, entre el mobiliario funerario, hay numerosos objetos de origen danubiano: adornos de cinturones y de espadas en estilo polícromo y fíbulas de chapa de plata con cabeza semicircular y pie romboidal.

El examen de los huesos aporta otras informaciones al antropólogo: los cráneos de varios esqueletos presentan señales de una deformación intencionada. Si a los niños se les ciñe la cabeza con unas bandas muy apretadas, los huesos, maleables a esa tierna edad, se desarrollan en las direcciones que se les deje libres y van adoptando una forma que depende de la posición de las bandas opresoras; en ciertos casos, el cráneo resultante semeja un pan de azúcar. Según lo ha demostrado Luc Buchet, del Centro de Investigaciones Arqueológicas de Sofía-Antípolis, tal costumbre era muy común entre los bárbaros, sobre todo entre los alano-sármatas y los hunos, y Atila contribuyó a su difusión; la presencia de individuos con el cráneo artificialmente deformado no prueba su pertenencia a un grupo específico.

La deformación de los cráneos

Las mujeres que vivían a finales del siglo V en Saint-Martin-de-Fontenay eran probablemente descendientes de la segunda, o quizá de la tercera, generación de poblaciones bárbaras de origen oriental. Habían conservado las prácticas de sus antepasados: ceñían con apretadas bandas los cráneos de sus hijos y usaban aún fíbulas de tipo danubiano. Al otro extremo del Imperio, en la necrópolis de Loutchistoe, se han hallado también cráneos deformados de mujeres que fueron enterradas a comienzos del siglo VI.

Los bárbaros fueron los principales transmisores de esa moda por toda Europa occidental, desde el norte del mar Negro hasta la Baja Normandía. Se ha podido comprobar que la práctica de la deformación voluntaria del cráneo, importada por los alanos y los germanos orientales, siguió el mismo camino que los demás vestigios de la moda húnica, la misma ruta que los llevó del este hacia el oeste.

Para los antropólogos, las necrópolis, el mundo de los muertos, son un acceso al mundo de los vivos. El conocimiento de las prácticas funerarias y del mobiliario asociado a ellas ilustra las relaciones de la población con la muerte, e incluso su organización social. Estudiando la edad, el sexo, la talla, la morfología y las patologías de los esqueletos sacados a la luz se obtienen muchos datos no sólo acerca de cada individuo, sino también del conjunto de la población.

Según los estudios antropológicos que se han hecho sobre las necrópolis del período de las grandes migraciones, los bárbaros no eran muy numerosos en las comunidades que los recibían. Los de la primera generación suelen estar enterrados en un recinto funerario reservado para ellos. Dos generaciones más tarde, desaparecen los distingos; los bárbaros son asimilados tanto más fácilmente por la población indígena cuanto dejan

de mostrar vínculos con sus países de origen.

¿Qué amplitud alcanzaron aquellas migraciones y aquellas integraciones pacíficas? Ni la arqueología ni la antropología saben la respuesta. Basándose en la mera presencia de objetos orientales en las tumbas, no es posible averiguar el origen étnico de las personas enterradas. Los objetos de origen bárbaro están muy difundidos por la Europa del norte, del centro y del este, porque pertenecían a unas aristocracias militares que se desplazaban cambiando de campo sin cesar y llevaban consigo todos sus bienes.

Sus artesanías eran también imitadas por las poblaciones del mundo romano que entraban en contacto con tales representantes del poder. Los arqueólogos y los antropólogos se enfrentan hoy a un desafío: ¿cómo identificar, a partir del examen de los objetos y de los huesos encontrados en las tumbas, los orígenes de los bárbaros que se establecieron en la Galia?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ATTILA, LES INFLUENCES DANUBIENNES DANS L'OUEST DE L'EUROPE AU Ve SIÈCLE. Textos reunidos por Jean-Yves Marin, Publications du Musée de Normandie, Caen, 1990.

LES GOTHS (Ier-VIIe SIÈCLES AP. J.-C.). M. Kazanski. Éditions Errance, París, 1991.

LA DAME DE HOCHFELDEN. A. Alduc-Le Bagousse, J. Blondiaux y C. Pilet en *Cahiers alsaciens d'archéologie, d'art et d'histoire*, tomo XXV, págs. 74-90, 1992.

LA NÉCROPOLE DE SAINT-MARTIN-DE-FONTENAY. RECHERCHES SUR LE PEUPLEMENT DE LA PLAINE DE CAEN DU Ve SIÈCLE AVANT J.-C. AU VIIe SIÈCLE APRÈS J.-C. C. Pilet et al. Éditions du CNRS, 1994.

LES TOMBES "PRINCIÈRES" DE L'HORIZON UNTERSIEBENBRUN, LE PROBLÈME DE L'IDENTIFICATION ETHNIQUE. M. Kazanski en *L'identité des populations archéologiques,* Sophia-Antipolis, páginas 109-126, 1996.

LA NÉCROPOLE DE LOUTCHISTOE. A. Aibabine y E. Khairedinova en *Archéologie de la mer Noire. La Crimée à l'époque des grandes invasions, IVe - VIIe siècles*, Musée de Normandie, Caen, págs. 67-68, 1997.

LES ALAINS. V. Kouznetsov e I. Lebedynsky. Éditions Errance, 1997.

Shawn Carlson

Geotropismo, por última vez

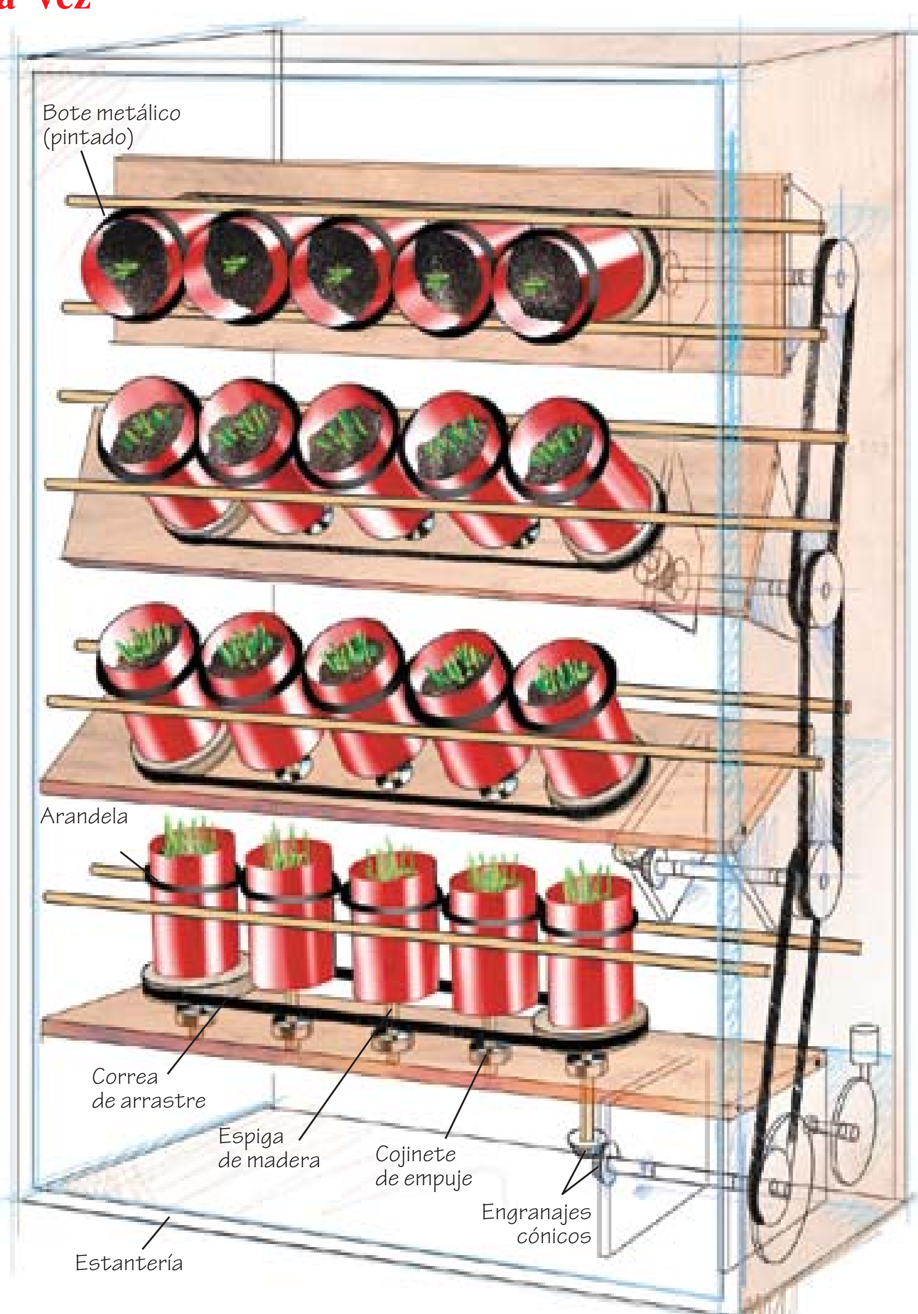
En junio de 1970, cuando yo tenía exactamente 10 años, se publicó en esta sección de la edición matriz un delicioso artículo sobre el geotropismo (la respuesta de las plantas ante la gravedad). Créase o no, fue escrito por mi abuelo, George Donald Graham. Siendo yo un niño, sentado en sus rodillas mientras me explicaba cómo había creado su experimento se despertó mi interés por las ciencias. Treinta años después, al redactar yo mismo esta sección (por última vez, lamento decirlo), dispongo de una nueva aportación al tema que deseo compartir.

Este último avance mío parte de la idea original de mi abuelo, quien cultivó semillas de maíz en condiciones de ingravidez simulada aprovechando un fenómeno: las plantas reaccionan muy perezosamente a la acción de la gravedad; se requiere del orden de un minuto para que las auxinas, las hormonas del crecimiento, cambien de posición, con lo que una planta tumbada puede empezar a enderezarse ajustando su crecimiento. Por tanto, razonó mi abuelo, si sometemos la planta a un giro incesante de modo que dé una vuelta completa en menos de un minuto, el espécimen será incapaz de discernir arriba de abajo. Acertó.

El aparato de mi abuelo promediaba a cero el campo gravitatorio terrestre rotando poco a poco las plántulas en el plano vertical. En abril de 1996 describí aquí un aparato más refinado, en el que las plántulas giraban lentamente en un plano (para anular la gravedad) y rápidamente en otro (para crear una fuerza centrífuga). El dispositivo era, no obstante, de construcción bastante difícil.

Pero hay una solución más fácil. Rotando lentamente las plántulas en un plano vertical la gravedad se anula por completo; rotándolas despacio en un plano horizontal no se consigue nada de particular. Por ello, si las plantas giran bajo un ángulo intermedio, experimentarán el mismo efecto que si estuvieran sometidas a una gravedad de intensidad intermedia.

¿Por qué? Cuando algo se inclina y gira sobre sí mismo (como en el dispositivo que se muestra), una parte de la fuerza gravitatoria tira a lo largo del eje de rotación y otra parte perpendicularmente al eje de rotación. Esta última componente se promedia a cero, pero la paralela al eje no varía. Entonces, las semillas que germinen en un recipiente inclinado en rotación experimentan una gravedad efectiva reducida según un fac-



1. Para simular una gravedad reducida se mantienen en rotación los botes donde crecen las plántulas. Modificando el ángulo de inclinación se consigue que varíe la intensidad de la atracción gravitatoria desde cero (arriba) *hasta su valor máximo* (al pie)

tor igual al seno del ángulo de inclinación (θ).

Este hecho facilita la experimentación con el geotropismo. Unase una máquina de reloj de desecho a un bote de zumo y móntese el artefacto de suerte que quede inclinado. Se rellena la puntera de un calcetín de nailon con tierra para macetas húmeda y unas pocas semillas para ensayos; luego se introduce en el bote. Eso es todo.

La técnica del bote giratorio se adapta, sin mayor complicación, para hacer germinar muchas semillas a la vez bajo distintas gravedades efectivas. La figura 1 ilustra mi primera acción en ese sentido. El artefacto consta de veinte botes de 25 centilitros dispuestos en los cuatro estantes de una librería. Cada estante alberga cinco botes inclinados un cierto ángulo. Decidí montarlos a 0, 30, 60 grados (para mis plantas de control). Una correa de arrastre rota los dos botes exteriores y los tres interiores son movidos por el rozamiento.

Para los ejes, empléese un tornillo de madera para sujetar el centro de cada bote a una espiga de madera de 12 milímetros. Seguidamente, con una sierra de agujeros y una taladradora eléctrica, se abren orificios en las bases para admitir los cojinetes de empuje. Se deslizan los cojinetes sobre las espigas y éstas se aseguran por los orificios. Recortamos de una placa de caucho pequeña las arandelas y las pegamos con un adhesivo adecuado.

En mi última realización, un único motor acciona los veinte botes. Por 24 dólares en una tienda de excedentes conseguí un motor eléctrico de un octavo de caballo, que funciona a 1600 rpm. Para rotar los botes a una vuelta por minuto necesité dos trenes de engranajes reductores: un tornillo sinfín y una corona con una relación de 80:1 y otra pareja de engranajes con una relación de 20:1. Los botes se deslizan a través de una correa y un par cónico, tal como se muestra en la ilustración. Los engranajes los rescaté todos en diversos almacenes de excedentes.

Me siento tan satisfecho con mi montaje actual que ya estoy planeando mi próximo modelo. Constará de nueve estantes con nueve botes cada uno. Dos de los estantes podrán ajustarse al ángulo deseado, previsión que me ayudará a estudiar el umbral de reacción geotrópica.

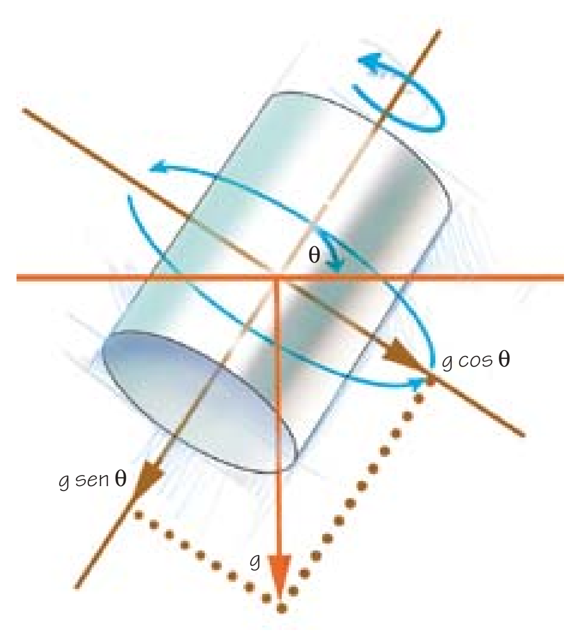
Me propongo analizar todos los resultados en función de la angularidad de las plántulas, que es la suma de todos los ángulos de incurvación que hay en un tallo dividida por la longitud de éste. Las plántulas germinadas bajo unas gravedades efectivas bajas suelen resultar muy retorcidas, por lo que presentan unas angularidades anormalmente altas. La plasmación gráfica de los valores de la angularidad en función de la gravedad efectiva debe permitirme identificar el rango dentro del cual una planta dada responde a la gravedad.

No necesitamos estropear las plantas para medir con precisión sus angularidades. Las coloco en un escáner digital, las cubro con una hoja de papel cuadriculado y suavemente las presiono contra el vidrio. La imagen escaneada recoge la planta entera, sobrepuesta a una cuadrícula de referencia. Desde luego, ese procedimiento aplana la estructura tridimensional dejándola en una representación bidimensional, pero aun así se consigue un valor aceptablemente exacto.

Una planta germinada en un entorno de baja gravedad puede que tenga más problemas que un tallo simplemente retorcido. Quien desee medir el metabolismo floral dispone, tras escanear el espécimen, de varias opciones. Lo más sencillo es contar las cuadrículas del papel cubiertas por las hojas de la planta. También puede imprimirse la imagen, recortar la silueta y pesar el papel. O quizás alguien pueda dar con un modo de contar los píxeles cubiertos por la planta, número que es proporcional al área. Este método me parece el más elegante, pero no he hallado un medio satisfactorio para realizarlo con el software estándar. Si alguien sabe de un procedimiento sencillo, sería bueno que compartiera sus ideas en el área de discusión en línea de la Society for Amateur Scientists.

Armado con estas técnicas, todo aficionado ambicioso puede ponerse a indagar las dependencias secretas de las plantas con la gravedad. En este campo, es fácil mantenerse hombro con hombro con los profesionales. ¿Cuáles son las plantas alimenticias que un día podrían sustentar a los asentamientos humanos en la Luna o en Marte? Acaso las mismas investigaciones del lector pudieran colaborar en su desarrollo.

Para más información acerca de este y otros proyectos para aficionados, compruébese el debate en línea en el sitio Web de la Society for Amateur Scientists. Enlácese con www.sas.org y haga clic en el botón "Forum". Se puede escribir a la sociedad al 5600 Post Road, Suite 114-341, East Greenwich, RI 02818 o telefonear al 401.823.78.00.



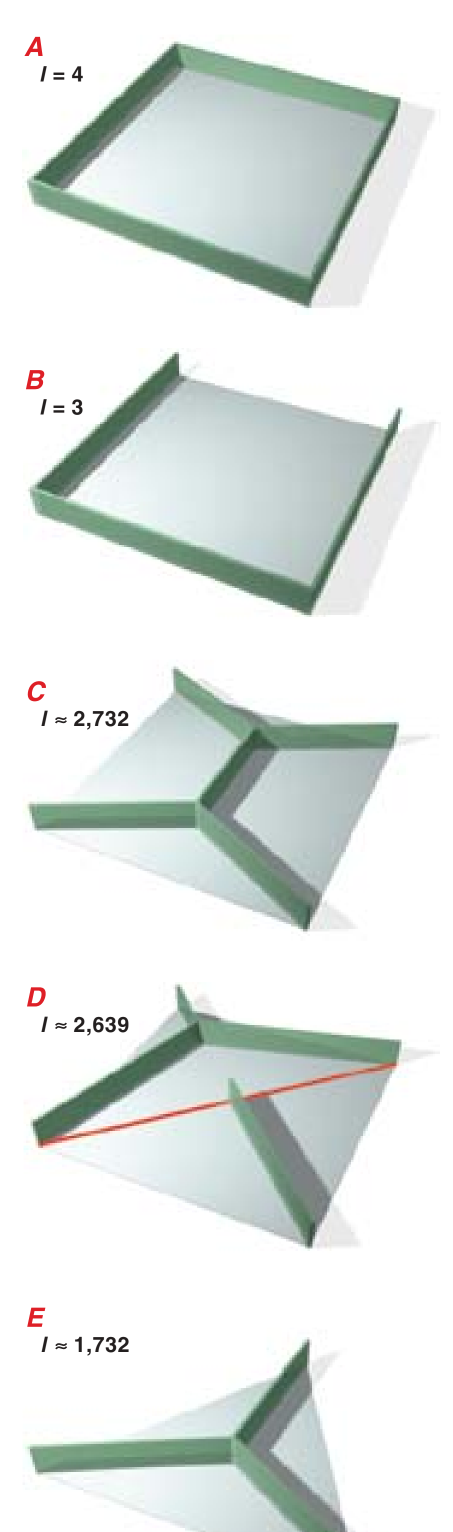
2. La aceleración gravitatoria (g, unos 10 metros por segundo cada segundo) posee una componente según el eje de rotación y otra perpendicular al mismo. Esta tiene un valor medio nulo cuando el bote rota

3. Unos engranajes reductores frenan la velocidad del motor eléctrico desde 1600 rpm hasta justo una vuelta por minuto en el árbol de salida

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

En busca de la intimidad poligonal

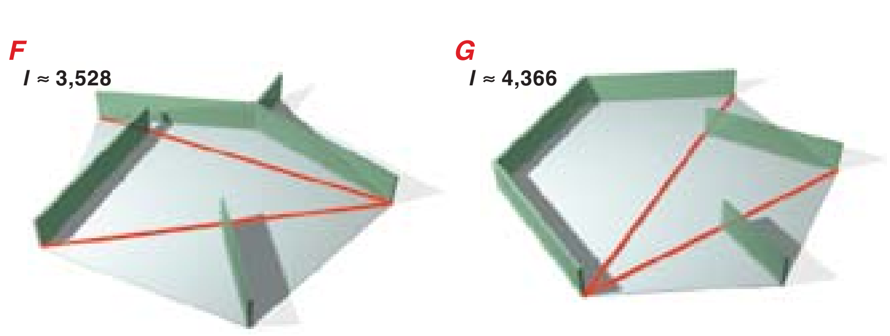


La geometría combinatoria es uno de los campos más atractivos de las matemáticas. Está repleta de problemas de apariencia sencilla, para los que no se conoce solución. En tales problemas se pide hallar configuraciones de líneas rectas, curvas o de otras figuras geométricas, y alcanzar cierto objetivo con máxima eficiencia. Me ceñiré al "problema del cuadrado opaco" y algunas de sus fascinantes variaciones. Berndt Kawohl, de la Universidad de Colonia, me ha hecho prestar atención a tal problema; esta exposición se basa en un artículo que me remitió.

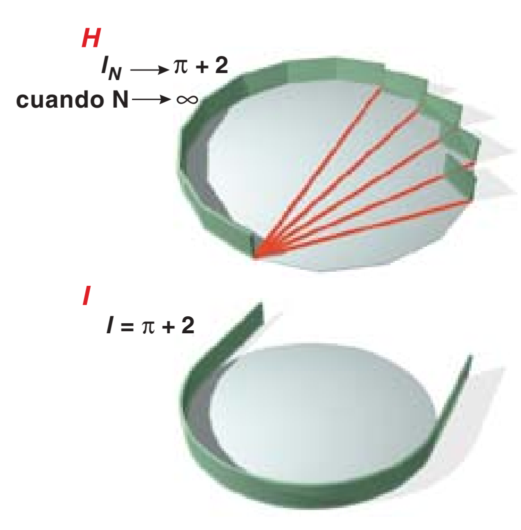
Supongamos que poseemos un terreno, que por sencillez supondremos cuadrado y de 1 km de lado. Para asegurar la intimidad, deseamos construir una valla opaca, una barrera que cierre el paso a toda mirada, esto es, a toda línea recta que atraviese el terreno vallado. Por economía, nos gustaría que la valla sea de la mínima longitud posible. ¿Qué forma deberá dársele? La valla puede ser tan complicada como se quiera, y estar compuesta por multitud de piezas, sean rectas o curvadas.

La solución más obvia es, seguramente, alzar una valla a lo largo de todo el perímetro de la parcela, con una longitud total de 4 km (*figura 1 A*). Pero unos segundos de reflexión nos hacen ver una mejora: dejar sin vallar uno de los lados, y construir una U con esquinas en ángulo recto (*figura 1 B*). La longitud se ha reducido ahora a 3 km. Esta es la valla más corta posible, si se exige la condición adicional de que forme una única línea, sea poligonal o curva. ¿Por qué? Porque toda valla opaca ha de contener a los cuatro vértices del cuadrado; la U de tres lados es la más corta de todas las curvas que contienen a todos los vértices.

Sin esta restricción podemos, empero, construir una valla más corta que todavía nos resguarde de la mirada ajena. En la figura 1 C se dibuja una valla cuya longitud es $1 + \sqrt{3}$ (alrededor de 2,732 km). Todos los ángulos que forman las paredes son de 120 grados. Las configuraciones de esta clase reciben el nombre de "árboles de Steiner"; con ángulos de 120 grados se logra un árbol de longitud mínima. Se trata de la valla más corta que forma una figura conexa. Si se admite que el vallado conste de varias piezas desconectadas, su longitud total puede reducirse hasta unos 2,639 km (*figura 1 D*). Las tres líneas de la mitad superior del diagrama también concurren tendiendo ángulos de 120 grados. Es opinión general que este ejemplo determina la valla opaca de mínima longitud correspondiente a una par-



1. Las vallas opacas son barreras que bloquean toda mirada a través de una figura dada. Para un cuadrado, una valla perimetral (A) *y una valla trilátera en forma de U* (B) *son opacas, pero un árbol de Steiner* (C) *y una valla de dos componentes* (D) *son más cortas. La valla opaca mínima para un triángulo equilátero sigue siendo un árbol de Steiner* (E). *Entre las vallas opacas conocidas para el pentágono regular* (F) *y el hexágono regular* (G), *las más cortas constan, en cada caso, de tres componentes. Todas las longitudes indicadas* (l) *son aproximadas, excepto en los casos* A *y* B



2. *Un polígono con número par grande de lados tiene una valla opaca con muchas componentes* (H). *Su longitud total tiende hacia la longitud de la mínima valla opaca simple correspondiente a un círculo* (I)

cela cuadrada, pero ello no ha sido demostrado aún.

A decir verdad, los matemáticos no tienen la certeza de que exista una valla opaca de longitud mínima. Hipotéticamente, quizá se pudiera seguir reduciendo cada vez un poquito más tal longitud dando a la valla formas de complicación creciente. Sí ha sido demostrado que, para cada número dado de componentes conexas, existe una valla opaca de longitud mínima. Lo que se ignora es si la longitud mínima sigue decreciendo conforme aumenta, sin límite, el número de componentes conexas, y si una valla de infinitas componentes conexas puede dar mejores resultados que todas las vallas con número finito de componentes. Aunque estas posibilidades parecen inverosímiles, no han podido descartarse.

Kawohl ha proporcionado una preciosa demostración de que la figura 1 D corresponde a la valla más corta compuesta exactamente por dos componentes. Prueba que una de las componentes ha de contener tres de los vértices del cuadrado, y la otra, al vértice restante. La primera componente ha de ser, por tanto, el árbol de Steiner mínimo que conecta tres vértices, y determina la configuración que vemos en la parte superior de la figura. La envoltura convexa de esta configuración —la mínima región convexa que la contiene— es el triángulo resultante de cortar al cuadrado en dos a lo largo de una diagonal. La segunda componente ha de ser la línea de mínima longitud que conecte a dicho vértice con la diagonal: la recta diagonal que va desde tal vértice hasta el centro del cuadrado.

¿Qué ocurre si la parcela no es cuadrada? Si se trata de un triángulo equilátero, la mínima valla opaca es el árbol de Steiner que se obtiene al unir cada vértice con el centro del triángulo mediante una recta (*figura 1 E*). En el caso de un pentágono regular, la mejor de las vallas opacas conocidas consta de tres piezas (*figura 1 F*). Una de las piezas es un árbol de Steiner que conecta tres vértices adyacentes del pentágono. La segunda es tramo recto que une al cuarto vértice con la envoltura convexa de los otros tres. La tercera pieza es otro segmento que une el quinto vértice con la envoltura convexa de los otros cuatro. No se ha demostrado que tal valla tenga longitud mínima, pero tampoco ha sido descubierta ninguna valla opaca más corta.

La valla más conocida para el hexágono regular es parecida (*figura 1 G*). Dado que los ángulos del hexágono son de 120 grados, el árbol de Steiner está formado por tres lados consecutivos de la propia figura, que conectan cuatro vértices consecutivos. La segunda componente de la valla es la línea más corta que lleve desde un quinto vértice hasta la envoltura convexa del árbol de Steiner, y la tercera, la línea más corta que conecte al sexto vértice con la envoltura convexa de los otros cinco. Aquí tampoco se ha podido demostrar que esta valla tenga longitud mínima.

Una construcción del mismo tipo puede servir para trazar una valla presuntamente mínima para cualquier polígono que posea un número par de lados (*figura 2 H*). Basta dividir el polígono en dos mediante un diámetro que una dos vértices opuestos. La primera componente de la valla está constituida por todos los lados yacentes en una de las mitades, que forman la equivalente poligonal de una semicircunferencia. La segunda componente es la línea más corta que conecta al vértice siguiente con la envoltura convexa de la primera componente. La tercera componente es la línea más corta que conecte al vértice siguiente con la envoltura convexa de las dos primeras componentes, y así sucesivamente.

Un polígono regular con gran número de lados se parece mucho a una circunferencia. ¿Cuál es la valla más corta que logra hacer opaco a un círculo? Supongamos, por sencillez, que el radio del círculo sea de 1 km. La valla más sencilla que se nos ocurre es la circunferencia del círculo, que tiene una longitud de 2π, unos 6,283 km. Es posible mejorar este resultado si se permite que la valla salga al exterior de la parcela circular. Alcemos la valla a lo largo de una semicircunferencia, creando un semicírculo, y prolonguémosla añadiendo dos líneas de 1 km que sean tangentes al círculo en los extremos del semicírculo (*figura 2 I*). La forma en U resultante constituye una valla opaca para el círculo, y su longitud es de $\pi + 2$, unos 5,142 km.

Se puede demostrar que esta figura define la valla opaca mínima más corta si nos empeñamos en que forme una curva simple; es decir, que sea de una pieza y carezca de puntos de ramificación. Otra descripción posible del problema consiste en imaginar zanjas en lugar de vallas. Supongamos sabido que a una distancia máxima de 1 km de un punto dado pasa una tubería recta. ¿Cuál es la mínima zanja que podemos excavar, con la certeza de dar con la tubería? Sabemos que esta conducción ha de atravesar un círculo de un kilómetro de radio, con centro en el punto de que se trate y, por consiguiente, ha de interceptar a cualquier valla opaca correspondiente a ese círculo. Así pues, debemos excavar una zanja en forma de valla opaca.

En esta variante del problema resulta natural permitir que la zanja salga al exterior del círculo; en cambio, las vallas suelen construirse en el terreno propio, no en los vecinos. Kawohl demuestra que la valla opaca de longitud mínima enteramente contenida en el disco no puede medir más de $\pi + 2$ km. Para ello, considera la valla conjeturada para un polígono de gran número par de lados, que se aproxima mucho al círculo. Un cálculo trigonométrico demuestra que la longitud de la valla presentada en la figura 2 H tiende hacia $\pi + 2$ al ir creciendo ilimitadamente el número de lados del polígono.

Ahora bien, ¿son las vallas conjeturadas realmente las más cortas o existe algún procedimiento para abreviarlas un poco? ¿Y qué sucede en el caso de otras figuras, como los polígonos irregulares (convexos o no), las elipses o los semicírculos? ¿Qué decir del mismo problema en tres dimensiones (el cubo o la esfera opacos)? Los amantes de las matemáticas recreativas tienen mucho donde investigar.

Mark Fischetti

Pistolas de radar

Ebrios de velocidad, corremos por la autopista. De pronto, divisamos el coche patrulla; reducimos marcha. Demasiado tarde: la pistola de radar nos ha tenido en su punto de mira. La multa es inapelable.

El radar está en las grandes vías desde comienzos de los años cincuenta. Desde entonces, las pistolas han ido evolucionando para aumentar su alcance, mejorar la captación de blancos y burlar a los detectores de radar. La frecuencia de las microondas radáricas, que se reflejan en los objetos para indicar su velocidad, ha aumentado desde la original banda X (10,125 gigahertz) hasta la banda K (24,150 Ghz) en los años setenta, y hasta la banda Ka (33,4 a 36,0 Ghz) a finales de los ochenta. La potencia de esas microondas emitidas son unos relativamente inocuos 15 a 50 miliwatt.

En 1991 los fabricantes presentaron el radar de láser, o lidar. Este persigue a los conductores con luz infrarroja de 904 nanómetros. La ventaja principal del lidar estriba en la estrechez de su haz, cuya anchura es inferior a un metro a 300 metros de distancia. El cono de microondas de una pistola de radar es de unos 12 grados, o sea, de una anchura de 64 metros a los 300 metros. Niebla, lluvia y nieve reducen la precisión del lidar, no así la del radar, aunque pueden condicionar su alcance.

Los fabricantes de pistolas de radar para la policía suelen producir también dispositivos para medir la velocidad de pelotas de béisbol y lanchas rápidas, para controlar la velocidad en los enganches automáticos de vagones de ferrocarril y para determinar datos científicos de interés; por ejemplo, el caudal de los ríos en sus crecidas, que sirve para predecir las inundaciones. La pistola de radar normal tiene un alcance de 1200 metros y dura 15 años.

Los detectores de radar, legales en algunos sitios, emiten un sonido de alarma cuando captan una señal entrante que coincide con las frecuencias de radar estándares, cabe suponer que para dar tiempo a los conductores para aminorar la velocidad. Los perturbadores de radar ilegales llevan aparejados el cargo de obstrucción a la justicia. Emiten una frecuencia de microonda muy intensa, que el automovilista ajusta para que represente una velocidad admitida; pero una pistola de radar situada carretera adelante seleccionará esa señal, porque es más potente que la señal de la pistola que el automóvil está reflejando.

1. LAS PISTOLAS DE RADAR emiten un chorro continuo de microondas a una frecuencia preestablecida. En virtud del efecto Doppler, cuando las ondas reflejadas en un objeto avanzan hacia la fuente, su frecuencia aumenta. La pistola, estacionaria, mide el grado de corrimiento, determinante de la velocidad.



2. UNAS BATERIAS alimentan un diodo Gunn, que forma parte de un emisor de microondas. Este emite microondas que se focalizan en un haz merced a una bocina y una lente (en conjunto, la "antena"). La antena recibe las ondas reflejadas por los objetos que el haz halla a su paso. Un diodo mezclador compara las señales salientes y entrantes e introduce la diferencia, a través de un convertidor analógico-digital, en un chip procesador de señales digitales, o chip DSP. Este analiza las frecuencias de la señal entrante y envía el valor de la velocidad de la respuesta más intensa (normalmente el vehículo más cercano) al visor de la pistola.



4. UNA DESALINEACION entre una pistola de radar fija y un blanco móvil crea un efecto "coseno" que reduce la frecuencia de respuesta por un factor igual al coseno del ángulo entre la pistola y el vehículo, reduciendo así la velocidad leída. Por ello, la policía tiende a estacionarse cerca de la calzada y detectar a los vehículos lejos campo adelante. En un patrullero que se desplace con el tráfico, no obstante, la pistola en movimiento determina la velocidad relativa entre ella y el blanco; a la velocidad leída podría añadirse artificialmente un ángulo cualquiera. Los agentes son entrenados para contrastar la velocidad de patrulla indicada en la pistola con el velocímetro de su propio vehículo.

ONDA SALIENTE
ONDA ENTRANTE
VISOR
INDICADOR DIGITAL
IMPULSO SALIENTE
DIODO LASER
IMPULSO ENTRANTE
BATERIA

3. EN UNA PISTOLA DE LIDAR, la energía de las baterías se potencia hasta la alta tensión necesaria para accionar un diodo láser mediante un circuito electrónico. El diodo emite impulsos de láser infrarrojos cada cinco milisegundos. Los impulsos reflejados en el blanco llegan a unos filtros, que los enfocan sobre un diodo de alud, el cual los convierte en señales electrónicas. Un circuito cronometrador de alta velocidad rastrea el tiempo que tarda un impulso en reflejarse y volver desde el blanco, y unos algoritmos emplean esa información para determinar la distancia al objeto. Esos algoritmos vuelven a calcular la distancia para los pulsos siguientes y luego determinan la velocidad dividiendo la variación en distancia por el intervalo de tiempo.

¿Sabía usted que...?

- **UNA PALMERA EXCESIVAMENTE VELOZ**
  En 1979 un reportaje de la televisión de Miami donde se mostraba a una pistola de radar cronometrando en 140 kph la velocidad de una palmera puso sobre el tapete los errores de los radares. Aunque se ha avanzado en la prevención de tales errores, lo cierto es que los aparatos pueden a veces ser embotados por las interferencias de los radares de los aeropuertos cercanos, radios de banda ciudadana, teléfonos celulares, luces de vapor de mercurio u otros radares policiales, así como por los armónicos de los reguladores de la temperatura y ventiladores del propio vehículo policial.

- **MUSICA PARA LOS OIDOS**
  Los radares policiales emiten un tono de audio que aumenta proporcionalmente con la velocidad del blanco. En la tercera octava por encima del do natural, la nota do sostenido corresponde a unos 95 kph en el aparato de banda K de la Decatur, el re sostenido a unos 110 kph y el fa sostenido a unos 130 kph.

- **LOS PRIMEROS**
  Hartford (Connecticut) reclama la primera normativa sobre la velocidad de los automóviles; su ley de 1901 limitaba la velocidad de los automóviles a 19 kph en el campo y a 13 kph en la ciudad. New Amsterdam (nombre antiguo de Nueva York) aprobó la primera ley de "tráfico" americana, mediante la que se prohibía montar o conducir caballos al galope dentro de los límites de la ciudad.

NEXOS

James Burke

Despedida a la francesa



Hace tiempo, mientras consideraba las virtudes de la pronunciación figurada, recordé el nombre de "Featherstonhaugh", que en labios ingleses suena un extrañísimo "Fanshaw". Ayer volví a topar con George William Featherstonhaugh, científico y diplomático. Nacido en Inglaterra y asentado en la americana Duanesburg, se casó en 1808 con la hija de un antiguo alcalde de Nueva York. Se interesó por el ferrocarril. Regresó a Inglaterra para hablar con el especialista en líneas ferroviarias George Stephenson. De vuelta a los Estados Unidos, levantó algunas piedras y se convirtió en el primer geólogo asalariado del gobierno de Estados Unidos. Le fueron encomendadas investigaciones en Arkansas, Wisconsin, Illinois, Georgia y ambas Carolinas. El descanso le llegaría en 1844, en El Havre, Francia, como cónsul británico. ¿Quién dijo que antes de que se inventaran los viajes organizados nadie se movía de casa?

La afición de George William de escudriñar las piedras fue alentada durante su viaje a Jolly Olde. Mientras visitaba a unos amigos en Scarborough, Yorkshire, conoció al famoso William Smith. Topógrafo de extracción humilde, observó que los mismos tipos de fósiles aparecían siempre en los mismos estratos, hecho que facilitaba la identificación de los últimos, algo de notable interés en asuntos de cortes. En 1815, tras estudiar los suelos del país entero, Smith concluyó su loado "Perfil de los estratos de Inglaterra y Gales". Repleto de ilustraciones de 21 lechos sedimentarios a todo color, se trata del primer mapa geológico propiamente dicho. Le valió el sobrenombre de "Estratos" Smith.

En los inicios de su carrera, Smith fue contratado en Woburn, propiedad de Francis, duque de Bedford. Disertó sobre geología en la reunión anual agrícola que el noble organizaba con otros aristócratas terratenientes. Allí también se hablaba de asuntos relacionados con la mejora animal, pues no en vano el duque Francis era propietario de una granja modelo dedicada a la cría de ovejas de raza, mucho antes de que llegara la manipulación genética. Así lo registró Arthur Young, diestro bailarín reconvertido primero en novelista y luego en escritor agrícola y secretario del primer Consejo de Agricultura (del que el duque era miembro). Young se había interesado muy pronto por la ganadería, pero se deslumbró con las brillantes luces de Londres en 1766 y entonces viajó sin parar durante el resto de su activa vida, sólo volviendo a casa de vez en cuando para escribir otro "Viaje a...", uno más. (Su relato más famoso es una vibrante narración de la revolución francesa en primera persona sobre las consecuencias que acarreó para la vida en un campo que hasta entonces se regía por una organización feudal.)

Walter Harte, hoy olvidado poeta, fue el eterno amigo que le alentó a escribir. Harte pasó años redactando la biografía del rey Gustavo Adolfo de Suecia, sólo para que su estilo fuera censurado como *pésimo* en el diccionario de biografía nacional. Poco más se puede añadir, excepto que conocía a un clérigo llamado Joseph Warton, otro perdedor. A pesar de conocer al doctor Johnson, a Garrik, a Reynolds, a Pope y a un sinfín de peces literalmente gordos, Warton se las apañó para hundirse sin dejar rastro. Después, eso sí, de escribir *El Entusiasta o El Amante de la Naturaleza*, considerado por algunos como el verdadero precursor literario del movimiento romántico (¡otro!).

En 1751 Warton acompañó a su protector, el duque de Bolton, de viaje por Francia. Pretendía el noble que, de fallecer durante el viaje la enferma duquesa, Warton lo casara de inmediato con otra acompañante de viaje, la encantadora Lavinia Fenton. A la altura de Aix-en-Provence la esposa aún resistía, así que Warton optó por regresar a su casa. Y entonces sí, la duquesa murió y tras veintitrés años (y tres niños) como amante del duque, Lavinia se convirtió en *excelentísima señora*. Los devaneos de Bolton con Lavinia habían empezado en 1728 cuando la descubrió interpretando a Polly Peachum en la *Opera de los Mendigos*, éxito de taquilla de todo el siglo XVIII. En Londres hubo 62 representaciones y en escenarios tan alejados como los de Malta se agotaron las entradas.

Otro tanto le ocurrió a su autor, John Gay. Todo el resto de su obra cayó en el más justo de los olvidos. Razón por la cual se pasó la mayor parte de su vida quejándose de la indiferencia que suscitaba y de una permanente falta de dinero. En cierta ocasión, adornado por un éxito reciente y en su afán por codearse con la alta sociedad, compartió las aguas curativas de Bath con la duquesa de Marlborough y su compañero William Congreve, dramaturgo y alguien importante en el mundo del teatro. Qué poco esperaba él terminar atropellado por el carruaje de Congreve para morir a causa de las heridas.

Antes de que hubiera pasado un siglo, el descendiente de Congreve, Sir William, también vio de cerca la muerte, pero de un modo distinto, gracias a su novedoso invento de cohetes Congreve de explosión controlada. Si en Fort McHenry se utilizaron sin tregua durante la pequeña escaramuza anglo-americana de 1812, en 1807 se ensayaron en la ciudad de Copenhague, que quedó prácticamente arrasada. Unas veces se gana, otras se pierde.

Hacia 1820, William se vio involucrado en un proyecto por desarrollar un método de impresión de sellos de dos colores mediante planchas compuestas, para evitar

la falsificación. Su socio en este empeño fue un tal Bryan Donkin, ingeniero e inventor, que en 1812 se puso a envasar comida en latas y que en 1804 ya había construido la primera máquina de fabricación continua de papel de Inglaterra. Movida manualmente, una cadena de pequeños cubos extraía de una tina la pulpa de papel y la vaciaba sobre una correa de malla que vibraba para escurrirla. Luego era prensada entre unos rodillos y se dejaba secar convirtiéndose (entre otras cosas) en el primer papel de pared sin fin. Algo que se entenderá mejor si se sabe que el inventor original de la máquina, Nicolas-Louis Robert, era ciudadano francés. Cuando la inventó en 1798, en Francia el papel de pared era la última moda, porque daba la engañosa apariencia de que uno se podía permitir las tapicerías que, en realidad, no se podía permitir.

Sin embargo, con la licencia que se le concedió para imprimir dinero Robert nunca ganó un franco. Su única hazaña en la vida fue conocer a Jacques-Alexandre-César Charles, quien acabó de profesor de física experimental en el Conservatorio de Artes y Oficios de París. En diciembre de 1783, 10 días después del famoso primer vuelo tripulado por un globo aerostático Montgolfier con paja y papel por combustible, Charles y Robert llegaron cinco veces más lejos y permanecieron flotando cinco veces más con su *Charlière* de hidrógeno, algo que determinó a partir de entonces el diseño de los globos, hoy redicivos.

Pero, ¿quién se acuerda de esto? ¿Y quién sabe que también fue Charles el padre de la ley de la relación entre la presión del gas y la temperatura antes de que Gay-Lussac la remodelara y se llevara la fama? Pero, como francés, tal vez lo peor que le pudo ocurrir al pobre Charles fue que su joven y bella esposa Julie iniciara un apasionado romance con un poeta al que conoció mientras tomaba las aguas de un balneario en Aix-les-Bains en 1816, algo que no se molestó en ocultar a su regreso a París.

El alto y atractivo Alphonse de Lamartine pronto fue requerido en todos los salones. El más romántico de los románticos, confesaba que hacer el amor le calmaba los nervios. A juzgar por el número de aventuras que se le conocen, debió acabar en estado catatónico. Hacia 1833 sus escritos le granjearon tal predicamento, que era miembro apreciado de las clases ociosas, tanto por su crítica literaria como en política, en su nuevo papel de miembro electo de la Cámara de los Diputados. Durante los diez años que duró su nueva carrera dio un giro radical a la izquierda.

Lamartine se adueñó de la causa de los trabajadores y propició la ahora vagamente recordada revolución de 1848, que acabó con el reinado del ciudadano Luis Felipe I y encumbró a Lamartine como ministro de asuntos exteriores en la nueva república, cartera curiosa para alguien con sus inclinaciones.

Mientras tanto, el infortunado Luis Felipe y su esposa huían hacia un lugar seguro, Inglaterra, haciéndose pasar por el señor y la señora Smith, "tío y tía" del cónsul británico en El Havre, el impronunciable George William Featherstonhaugh. *Au revoir*.

LIBROS

Razón y ciencia

Orígenes

THE FIRST FOSSIL HUNTERS. PALEONTOLOGY IN GREEK AND ROMAN TIMES, por Adrienne Mayor. Princeton University Press; Princeton, 2000. **THE SCIENCE OF MAN IN ANCIENT GREECE,** por Maria Michela Sassi. The University of Chicago Press; Chicago, 2001.

LES DOCTRINES DE LA SCIENCE DE L'ANTIQUITÉ À L'ÂGE CLASSIQUE. Dirigido por Roshdi Rashed y Joël Biard. Peeters; Lovaina, 1999. **PLATO. TIMAEUS.** Traducido al inglés e introducción de Donald J. Zeyl. Hackett Publishing Company. Indianapolis, 2000. **ARISTÒTIL. HISTÒRIA DELS ANIMALS.** Revisión del texto y traducción de Juli Pallí. Fundación Bernat Metge; Barcelona, 1996.

A. CORNELIO CELSO. LA CHIRURGIA. Edición preparada por Innocenzo Mazzini. Istituti Editoriali e Poligrafici Internazionali; Macerata, 1999. **ASTRONOMICAL PAPYRI FROM OXYRYNCHUS (P. Oxy. 4133-4300),** por Alexander Jones. American Philosophical Society; Philadelphia, 1999. **ESTUDIOS SOBRE TEXTOS LATINOS DE FITOTERAPIA ENTRE LA ANTIGÜEDAD TARDÍA Y LA ALTA EDAD MEDIA,** por Arsenio Ferraces Rodríguez. Servicio de Publicaciones de la Universidad de La Coruña; La Coruña, 1999.

Es aserto indiscutido que la ciencia occidental empezó en las riberas del mar Jónico con el abandono de los mitos por una explicación racional del mundo. Para corroborarlo se enumera a renglón seguido la teoría de presocráticos y su búsqueda de los *archai* o principios fundantes de las cosas. Pero esa página de la historia del saber necesita matizarse, concluyen Adrienne Mayor y Maria Michela Sassi, aquélla en *The First Fossil Hunters. Paleontology in Greek and Roman Times*, ésta en *The Science of Man in Ancient Greece*. Desde la óptica de ambas queda mucha ciencia por descubrir tras los mitos, leyendas y relatos literarios.

Grifos, centauros, cíclopes y gigantes —criaturas fabulosas que pueblan el mundo onírico clásico—podrían ser, despojados de ciertos excesos, algo más que meras ficciones. Sostiene Mayor que muchas figuras quiméricas y monstruosas son transformaciones, por la imaginación popular, de especies extinguidas que abundaron antaño en las tierras de la Hélade y el Lacio. El descubrimiento de huesos fósiles en determinadas circunstancias y lugares alimentó unos relatos fantásticos, que escondían una realidad de fondo. Igual que hoy, en la antigüedad clásica los cazadores de fósiles recogieron y midieron restos petrificados imponentes y los expusieron en museos y templos. A la hora de reconstruirlos, la imaginación suplió las carencias del conocimiento. Compete al historiador de la ciencia recorrer el camino inverso y extraer de la fábula, el lenguaje y el arte la verdad última subyacente.

Los orígenes de la leyenda del grifo, guardián del oro, se pierden en las febriles consejas de los buscadores escitas de oro en el Extremo Oriente. Hablaban ellas de monstruos de poderosa osamenta, que la paleontología actual atribuye al esqueleto de *Protoceratops* y otros dinosaurios, depositados sobre el suelo del desierto de Gobi. La autora va más allá. Ve en ese pequeño dinosaurio cornudo de Mongolia la imagen del grifo.

En la creencia popular clásica, los grifos son una raza quimérica de aves tetrápodas con pico de águila y garras de león, que daban grandes saltos en el aire, habitantes de desiertos salvajes y guardianes de tesoros de oro. *Protoceratops*, un herbívoro de unos 2,5 metros de largo, presentaba un pico, una protuberancia ósea en la región occipital del cráneo y cuatro pies con garras. Para un observador no experto, el pico podía confundirse con el de un ave y la prominencia ósea asociarse a un "moño" de pájaro.

A diferencia de otros animales mitológicos como Pegaso (caballo con alas), la esfinge (león alado con cabeza de mujer), Minotauro (hombre con cabeza de toro) o Centauro (mitad caballo, mitad hombre), el grifo no desempeñaba ningún papel en el panteón griego, sino que era una criatura del folklore popular. Carentes de poderes supernaturales, creíase que vivían en parejas o grupos, anidando sobre el suelo, defendiendo el oro de los intrusos y teniendo por presas équidos y quizás incluso humanos.

La leyenda se remonta por lo menos hasta el 675 a.C., cuando Aristeas, bardo griego, entró en contacto con nómadas escitios. Y aunque ningún autor clásico afirma haberlos visto nunca, los grifos se convirtieron en elementos imprescindibles del imaginario y la creación literaria y plástica. Así, en *Prometeo encadenado* de Esquilo (460 a.C.). No serían los únicos signos del conocimiento de los fósiles entre los griegos. Sabido es que la existencia de conchas en puntos alejados de la costa, les indujo a pensar en un océano primitivo. Y las leyendas de un pasado de gigantes se basan en la interpretación errónea de huesos de grandes mamíferos extinguidos o desaparecidos de la cuenca mediterránea.

Por caminos también colaterales —fisiognomía, etnografía, geografía y astrología— expurga Sassi las ideas antropológicas de la Grecia clásica. ¿En qué difieren hombres y mujeres, esclavos de hombres libres, bárbaros de griegos? ¿Portan esas diferencias impresas en el cuerpo? ¿Pueden clasificarse y explicarse?

De la investigación sobre los términos empleados para describir el color de la piel, se pueden extraer ciertas constantes. Las mujeres, por ejemplo, suelen presentarse demacradas y pálidas, lo mismo que artesanos y filósofos, mientras que los campesinos aparecen tostados por el sol. La palabra griega que designa el color, *chroma*, guarda una estrecha relación filológica con *chros*, que significa "superficie", en particular del cuerpo humano y, por tanto, "piel" o complexión. Hera y Afrodita tenían blancos los brazos, como las mortales Andrómaca, Nausica y Penélope, mientras que el aguerrido Ulises luce piel bruna y barba negra. Por su lado, los pintores realizaron una distinción esquemática entre el cuerpo obscuro del varón y el cuerpo más claro de la mujer, práctica que encontramos ya en frescos egipcios y minoicos.

En otro orden, el geográfico, Grecia se suponía el centro del mundo, do-



Heracles y Hesíone hacen frente al Monstruo de Troya. Cratera, ca. 550 a.C. Museo de Bellas Artes de Boston

tado de un clima con una mezcla óptima de calor y frío, seco y húmedo, mientras que los bárbaros vivían sometidos a un exceso o deficiencia de esos parámetros en sus entornos naturales. Blancos son los septentrionales y negros los etíopes. De los persas escribió Herodoto que tenían cráneos blandos porque vivían en la obscuridad y llevaban siempre caperuzas. "Vivir en la obscuridad" es expresión aplicada a menestrales y mujeres, que denuncia una clara inferioridad. Sometida está la mujer al cabeza de familia, como el cuerpo al alma, opinaba Aristóteles.

Se convierte en estereotipo la imagen del campesino sano, por dentro y por fuera, en tanto que el dialéctico Sócrates, Aristófanes *dixit*, ejerce una maléfica influencia en sus discípulos, reflejada en la complexión pálida de los escolares.

Desde otro ángulo menos sarcástico, las enseñanzas de Sócrates recogidas por su alumno señero (*Plato. Timaeus*) trazan la senda que habría de seguir el conocimiento racional. Intuido siglos antes (*Les Doctrines de la Science de l'Antiquité à l'Âge Classique*), el método científico llega con fuerza creciente hasta nosotros.

Recuerda *Les Doctrines de la Science* que la reflexión filosófica nació y se desarrolló a extramuros de la metaciencia, en zonas menos pretenciosas de la matemática, la astronomía, la óptica o la medicina. De acuerdo con ese supuesto, se repasan aquí las relaciones entre metafísica y lógica, metafísica y matemática, metafísica y cosmología, así como la prolongación de tales dualidades hasta el pensamiento moderno, medievales mediante.

El mundo empírico es el de seres concretos (*joristoi*) y móviles. Pero la ciencia, o episteme, debe centrarse en los caracteres necesarios y permanentes de los objetos estudiados. La necesidad se establece por la demostración, de donde la importancia de la estructura formal del lenguaje. Los caracteres permanentes atañen a la *physis*, fuente de movimiento.

Se atribuye a Pitágoras el establecimiento de tres postulados físicos importantes, a saber, la esfericidad de la Tierra, el uniforme y diurno movimiento de las estrellas, de este a oeste, alrededor de la Tierra inmóvil en el plano del ecuador y, por fin, el movimiento peculiar del Sol. Para Pitágoras sólo el movimiento circular uniforme encarna la simplicidad matemática, en la medida en que la misma trayectoria es continuamente recorrida durante un mismo lapso de tiempo.

Platón situó en el principio de toda cinemática el automovimiento eterno y puramente espiritual del alma, porque el mundo creado del caos preexistente por el demiurgo en el *Timeo* es un organismo vivo e inteligente, que exhibe orden y proporción matemática en su cuerpo y en su alma. Al comienzo del diálogo, Sócrates se encuentra con tres amigos: Critias, Timeo y Hermócrates. Tras las palabras de presentación del maestro, quedan para una segunda cita en la que éste oiría los puntos de vista de sus contertulios ocasionales. Timeo participa como "experto en astronomía".

El cuerpo y su representación

La Imagen del Cuerpo Humano en la Medicina Moderna (siglos xvi-xx). Dirigido por José María López Piñero. Fundación Bancaja; Valencia, 1999.

Bajo la orientación y dirección del profesor José M.ª López Piñero, la Fundación Bancaja ofrece, en sendas ediciones castellana y catalana, un extraordinario catálogo de la exposición que conmemoró el 450 aniversario de la publicación del primer libro de la Escuela Médica Valenciana del Renacimiento. En él se ha querido plasmar la evolución de los conocimientos médicos sobre las características y el funcionamiento del cuerpo humano, a partir del siglo xvi, época de revulsión y de transformación científica y cultural en todas las características del saber humano y, por ende, en la medicina, enlazando con la técnica actual.

A través de numerosos fondos pertenecientes a la Biblioteca y Museo Histórico-Médico del Instituto de Historia de la Ciencia y Documentación de la Universidad de Valencia-CSIC, se presenta y analiza una colección de 159 imágenes de extraordinario interés científico y belleza artística, a la vez que un equipo interdisciplinar estudia las técnicas de reproducción gráfica que se han ido sucediendo, desde la traducción de Miquel Joan Pascual de la *Anatomía* de Giovanni de Vigo (1537) o la parisiense de Galeno de Pérgamo (1531), junto a otra de Juan Valverde de Amusco (1556), precediendo el *De Humani Corporis Fabrica* de Andrea Vesalio (1555). Las técnicas de la entalladura, el buril o el aguafuerte sirvieron a artistas como Gaspar Becerra, Jan Stefan van Kalkar o Giulio de Musi, entre otros, para plasmar aquella nueva visión del cuerpo humano.

En el período barroco, la observación microscópica del cuerpo humano queda patente en la obra del grabador valenciano afincado en París, Crisóstomo Martínez, mientras que a lo largo del siglo xviii nuevas técnicas pictóricas ilustran las obras de Albinus, Santorini, Morgagni, Heister o del madrileño Martín Martínez.

Con las imágenes de Malpighi, Leeuwenhoek, von Kölliker y Ramón y Cajal, estos últimos ya en la segunda mitad del ochocientos, se enlaza con las nuevas técnicas del punteado en color, la cromolitografía y la xilografía, se llega a las representaciones del desarrollo del embrión y del origen de la especie humana, culminando con imágenes de anatomía comparada de Remak (1851), Saint Hillaire (1818) y de Ernst Haeckel (1891).

La anatomía al servicio de la cirugía cierra esta primera parte tras la que Felipe Jerez Moliner hace un análisis de las técnicas expuestas; José Luis Fresquet estudia, desde un punto de vista antropológico, la visión popular del cuerpo humano, mientras que el Catálogo alcanza la actual tecnología, la anatomía humana en imágenes, endoscopia, radiología, tomografía computarizada, etc., de la mano de Andrés Martínez-Almagro Andreo.



Lámina sobre músculos de A. Vesalio

Auguramos para esta publicación la categoría de obra de referencia obligada para los historiadores de las ciencias médicas, para los artistas, para los bibliófilos y para el gran público ilustrado.

José Danón

Platón describe aquí la historia del origen del cosmos como un *eikos logos* o *mythos*, un “relato verosímil”. Expresión máxima de su filosofía natural, engendra una creatura de diseño matemático, hecha a imagen de las Formas eternas y paradigmáticas.

Tras algunas formalidades, Timeo comienza su discurso con la distinción entre *lo que siempre es* (*to an aei*) y *lo que llega a ser* (*to gignomenon*) pero nunca es, distinción que en epistemología se da entre conocimiento (*noesis*), fundado en la razón (*logos*), y opinión (*doxa*), fundada en la percepción sensorial (*aisthesis*). Este mundo, siendo objeto de percepción de los sentidos, es algo que llega a ser. Y puesto que todo lo que llega a ser requiere una causa, el mundo debe tener una causa, es decir, un agente. Ese artesano, supone, debe haberse fijado en un modelo mientras conformaba el mundo, modelo que a su vez es algo que siempre es o algo que llega a ser. Claramente, afirma, el modelo es de la primera suerte; este mundo es la más hermosa de las cosas que llegan a ser, y su hacedor el más

excelente. El mundo, por tanto, aunque se trata de algo que llega a ser, se ha modelado empero en algo que es inteligible y eternamente estable.

Los mimbres empleados no son las causas primarias últimas de los presocráticos (fuego, aire, agua y tierra). Esos materiales son, a su vez, agregados de partículas sólidas geométricas cuyas superficies están compuestas de sutiles triángulos. El cubo se asigna a la tierra (como el elemento menos móvil o más difícil de mover), el tetraedro al fuego (como el "más móvil", que tiene "las aristas más agudas y cortantes"), el octaedro al aire, y el icosaedro al agua. Los sólidos o partículas elementales pueden transformarse; se transmutan unos en otros. En cuanto imagen de un modelo, ese cosmos orgánico refleja la Forma; en realidad, una constelación unificada de Formas subsistentes.

De los sistemas vivos se ocupó con mayor experiencia observacional contrastada su discípulo Aristóteles. (*Aristòtil. Història dels animals*). Juli Pallí, su traductor, es un filólogo competente y un expositor equilibrado que pone en las manos del lector lo que otros (Pellegrin, Byl, Lloyd) han profundizado en monografías o en ediciones críticas que le sirven de pauta.

Hemos de entender la biología aristotélica en el marco de su teoría de la subordinación de las ciencias. Anuncia en los *Meteorológicos* que, tras haber abordado las causas primeras de la naturaleza y de todo movimiento natural, es decir, la física, se enfrentará a un subcampo de ésta, el de los animales y las plantas.

A través de su fecunda obra biológica, llena de aciertos descriptivos y sistemáticos, se advierte el talante del filósofo inquisidor de causas últimas y unificador de leyes generales. Concede importancia soberana a la causa final. Compila datos de observación propia o facilitados por pescadores, cazadores y veterinarios, en la *Historia de los animales*. En *Sobre las partes de los animales* y *Sobre la marcha de los animales* esboza su teoría del ser vivo, un compuesto de materia y forma esencial (*Sobre el alma*), cuyas propiedades derivadas expone en *Sobre el movimiento de los animales* y, de modo particular, *Sobre la generación de los animales*.

Pese a una apariencia desordenada, una suerte de fichero revuelto de anotaciones sin nexo manifiesto, la *Historia de los animales* se atiene a un plan tripartito: anatomía comparada, métodos de reproducción y etología-ecología. En razón del tejido sanguíneo divide el reino animal en dos grandes grupos, nuestros vertebrados e invertebrados, que se expresan en multitud de géneros y especies. A la manera de los manuales todavía en boga, repasa la morfología, la anatomía interna y la reproducción, pero sus fuentes son hipocráticas, cribadas con disecciones propias.

El legado del maestro de Cos, articulado por Herón y otros seguidores, recibió en Roma un impulso notable (*A. Cornelio Celso. La Chirurgia*). Obscurecido por la fama pronta de Galeno, pesa sobre Celso el estigma de enciclopedismo. Prejuicio que desmiente, sin proponérselo, Innocenzo Mazzini en este alarde filológico que es la edición crítica de los dos libros últimos del *De medicina*. Frente al preciosismo de la traducción libre, prefiere la literalidad y, en ocasiones, banalidad del lenguaje médico latino de su tiempo. Para facilitar la tarea, ha agregado, en sendos apéndices, un glosario de términos médicos antiguos y un elenco de personalidades clásicas.

A falta de datos explícitos se infiere, por indicios indirectos, que Celso nació entre la España tarraconense y la Galia narbonense, en el siglo I antes de Cristo. De la lectura del *De medicina* emerge una personalidad de sólida cultura, independencia de criterio ante las escuelas contemporáneas en liza (empíricos, dogmáticos y metódicos) y respetuoso con la vida.

Tras haber expuesto la dietética y la farmacología, Celso acomete la tercera, y más drástica, vía terapéutica: la cirugía. Técnicas operatorias y patologías. Primero, un cuadro pormenorizado de las alteraciones habituales en la vida diaria o en el ejército: contusiones, abscesos, fístulas, dardos no arrancados, defectos de la cabeza, enfermedades oftalmológicas, enfermedades del oído, mutilaciones parciales de los labios, oídos y nariz, amigdalitis, hernia umbilical, ascitis, heridas intestinales, hernias inguinales, varices, hernias genitales, fimosis, cateterismo, cálculos, perforación de los genitales, gangrena, etcétera. Y luego, una descripción más sistemática siguiendo las regiones del esqueleto, de la cabeza a los pies. No menor interés reviste el minucioso armamentario para hacernos una idea cabal del desarrollo de la cirugía romana.

Roma, lo vamos viendo con creciente claridad, no fue sólo praxis médica, derecho y obra pública. Alexander Jones (*Astronomical Papyri from Oxyrynchus*) ha sacado a la luz un capítulo inédito de su astronomía, circunscrita hasta ahora a la obra de Ptolomeo y cuanto éste nos dice de sus predecesores y contemporáneos. Lo que sucedió desde mediados del siglo IV nos ha llegado a través de los comentarios de Pappus y Theón, ptolemaicos a la postre.

Pero hubo en Roma y en el Egipto bizantino, es decir, desde el siglo primero al siglo V d.C., otra astronomía de corte numérico babilónico, la que nos transmiten los papiros astronómicos descubiertos en las escombreras de Oxyrinchus. Jones presenta los textos, unos doscientos, traducidos y comentados. Su documentada introducción ofrece un cuadro coherente de la actividad astronómica en el Imperio Romano. Tales fragmentos corresponden a horóscopos, tablas numéricas y textos en prosa. Los horóscopos registran las posiciones del Sol, la Luna, los planetas y el punto ascendente de la eclíptica para el natalicio de una persona. Las posiciones de los cuerpos celestes aparecen en muchas tablas, calculadas para una fecha arbitraria. Además de ocuparse de la teoría y la observación, los textos en prosa enseñan a conocer las posiciones de los cuerpos celestes, eclipses, ortos y ocasos planetarios. Nos hallamos, pues, ante una astronomía dedicada a la predicción.

Abundan entradas precisas referidas al año del emperador, mes del calendario y día del mes y hora. Meses y años del reinado suelen darse de acuerdo con el calendario alejandrino o con el calendario egipcio antiguo. Este último consideraba el año de 365 días, repartidos en 12 meses de 30 días, más cinco epagonoménicos. El calendario alejandrino del Egipto romano sólo difería del anterior en la inserción de días intercalares.

Empieza también a perfilarse con mayor nitidez la evolución de la botánica romana en general y de la materia médica en particular (*Estudios sobre textos latinos de fitoterapia entre la Antigüedad tardía y la alta Edad Media*). Lo que ha venido constituyendo una auténtica cruz para los interesados en la traducción latina del *De materia medica* de Dioscórides, obra capital de la historia de la ciencia, y su recepción medieval, comienza a aclararse con el trabajo de Arsenio Ferraces. Si dejamos de lado una omisión que me parece importante, el estudio siquiera aproximativo de las plantas mencionadas, y una apresurada exposición que dificulta la inteligibilidad, hemos de re-

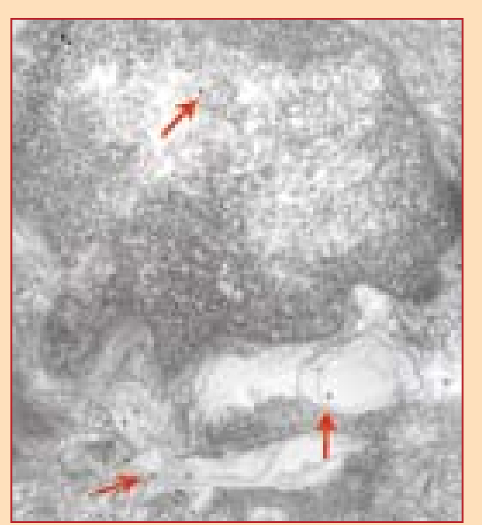
Orígenes de la genética molecular

WE CAN SLEEP LATER. ALFRED D. HERSHEY AND THE ORIGINS OF MOLECULAR BIOLOGY. Dirigido por Franklin W. Stahl. Cold Spring Harbor Laboratory Press; 2000.

La identificación del ácido desoxirribonucleico como el material hereditario —los genes son ADN— fue crucial en el desarrollo histórico-conceptual de la genética. El cambio de paradigma que supuso el ADN influyó de forma drástica en el desarrollo de esta ciencia, pudiendo decirse que en la genética hay un "antes del ADN" y un "después del ADN". Este cambio de paradigma no sólo ha influido en la genética en particular, sino también en la biología en general e, incluso, en la sociedad.

En la historia de la genética, la contribución científica de Alfred D. Hershey (1908-1997) fue definitiva cuando aportó en 1952 junto con Martha Chase la prueba experimental irrefutable de que en el virus T2 de *Escherichia coli* la información genética estaba contenida en el ADN y no en las proteínas.

Durante muchos años, debido a la equivocada "hipótesis del tetranucleótido" que consideraba a la molécula de ADN compuesta por la sucesión monótona de una misma secuencia de cuatro bases nitrogenadas, las proteínas fueron las más firmes candidatas a ser la "substancia hereditaria" en razón de su aparentemente mayor variabilidad frente al ADN. Así, son muy significativas las influyentes palabras del citólogo E. B. Wilson, recogiendo, en 1925, el pensamiento biológico de la época: "...los ácidos nucleicos del núcleo son en conjunto notablemente uniformes [...] en contraste con las proteínas [...] Las diferencias entre diferentes 'cromatinas' depende de sus componentes básicos o proteicos y no de sus ácidos nucleicos."



Enzimas reparadoras de ADN (puntos negros)

Desbancar a las proteínas como candidatas a ser la "substancia hereditaria" a favor del ADN no fue tarea fácil. Así se explica que los trabajos de Avery, Mac Leod y McCarty que les llevaron a demostrar en 1944 que el "principio transformante" propuesto por Griffith en 1928 era ADN no fueran aceptados como prueba concluyente de que la información genética estaba contenida en el ADN y no en las proteínas. Cuando Hershey y Chase (1952), utilizando fagos radiactivos marcados con S^{35} y P^{32} que marcaban respectivamente las proteínas y el ADN, demostraron de nuevo que la información genética estaba contenida en el ADN y no en las proteínas, la comunidad científica dio por concluida la controversia y aceptó también como válidos los experimentos de Avery y colaboradores.

La fecha de 1952 representa el pistoletazo de salida de la vertiginosa carrera del ADN: el conocimiento de su estructura molecular de la doble hélice (Watson y Crick, 1953), el mecanismo de replicación (Kornberg, 1956; Meselson y Stahl, 1958), el desciframiento del código genético (Nirenberg, Ochoa y Khorana, 1961-1966), la regulación génica (Jacob y Monod, 1961), las moléculas de ADN recombinante (Berg, 1972), la secuenciación (Sanger, Gilbert, 1975, 1977), la amplificación por PCR (Mullis, 1985), etc. que desembocaron en la transgénesis, la genómica y la clonación por transferencia de núcleo como representantes más importantes de la genética de nuestros días.

El libro que nos ocupa es el resultado del homenaje que sus discípulos y colegas de Cold Spring Harbor Laboratory le rindieron siete semanas después de su muerte, acaecida el 22 de mayo de 1997, cuando él tenía 88 años.

En la sección I, el libro recoge varios ensayos que glosan la vida y obra de Hershey escritos por varios de sus discípulos y colegas, pudiendo citarse, entre otros, a F. W. Stahl, W. Szybalski, R. A. Weisberg, R. D. Hotchkiss, y J. Cairns.

En la sección II, "Recuerdos", se incluyen breves comentarios y anécdotas a cargo de A. M. Campbell, M. Ptashne, G. S. Stent, S. Benzer, I. Herskowitz, B. Wallace y N. Zinder.

La sección III reúne trabajos y ensayos originales de Hershey. Son notables también sus Informes Anuales de Investigación (1950-1971) como director de la unidad de investigación genética de la Institución Carnegie de Washington. Como dice el editor del libro, Hershey se comunicaba con los miembros del "grupo de los fagos" enviándoles copias de estos informes anuales que, aunque no pasaban por la criba de los críticos anónimos de las revistas, su contenido era aceptado sin género de duda alguna y debatido y comentados en todas partes.

Para los amantes de la historia de la genética, el libro coordinado por Franklin W. Stahl en homenaje a Alfred D. Hershey es un verdadero regalo porque nos introduce en la historia del "grupo de los fagos" encabezado por Max Delbrück, Salvador Luria y el propio Hershey. Los tres recibieron el premio Nobel de fisiología y medicina en 1969 "por sus descubrimientos sobre el ciclo de reproducción de los virus y el papel del material genético en las bacterias y los virus".

—JUAN RAMÓN LACADENA

conocer el espléndido trabajo filológico de este joven latinista español.

Esta investigación de grado ampliada gira en torno a dos traducciones fragmentarias de la obra de Dioscórides, en las que se podría haber inspirado san Isidoro para la redacción de las *Etimologías*. Se trata de dos tratados pseudohipocráticos, el *De herbis femininis* y los *Dynamidia* (compuesto por varios libros). Ambos poseen extensos paralelismos entre sí, si bien los *Dynamidia* presentan muchos otros fragmentos de procedencia dioscorídea no atestiguados en *De herbis*, no obstante ser éste más cercano al escrito del anazarbeo.

Los *Dynamidia* estudiados nos han sido transmitidos por seis códices medievales, en los que se advierte un texto común originario que ha sufrido en el curso de los siglos transformaciones, supresiones y adiciones diversas, éstas tomadas de otros autores, de Gargilio Marcial sobre todo. Es tesis del autor que los *Dynamidia* son posteriores a las *Etimologías* de Isidoro, de las que tomarían préstamos.

LUIS ALONSO

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA VIDA INTERNA DEL PROTON, por Robert Klanner

Tras ocho años de funcionamiento, el acelerador de partículas Hera de Hamburgo —una especie de "supermicroscopio electrónico"— ha mejorado enormemente el cuadro global que se tiene de la estructura del protón y de las fuerzas que actúan en la naturaleza.

ORIGEN MINERAL DE LA VIDA, por Robert M. Hazen

El aire, el agua y las rocas eran las únicas materias primas en la Tierra primitiva. Los primeros seres vivos tuvieron que construirse con esos recursos primarios. Nuevos experimentos dan a entender que es muy posible que los minerales —los componentes básicos de las rocas— desempeñaran papeles centrales en tan extraordinario proceso.

ALIMENTOS TRANSGENICOS:

INOCUIDAD DE LOS ALIMENTOS TRANSGENICOS, por Kathryn Brown

¿Son los cultivos genéticamente modificados la materialización de los sueños de los ambientalistas o están gestando un desastre? La ciencia busca respuestas.

PRODUCTOS TRANSGENICOS E INGESTA, por Karen Hopkin

Más de la mitad de los alimentos que ofrecen los supermercados de algunos países contienen ingredientes transgénicos. ¿Ha sido demostrada su seguridad para el consumo humano?

POLEMICA EN TORNO A LA NECESIDAD DE LOS ALIMENTOS TRANSGENICOS, por Sasha Nemecek

Dos figuras punteras del debate sobre ingeniería genética defienden posiciones antagónicas.

LA REALIDAD VIRTUAL, por Jaron Lanier

La teleinmersión tridimensional podrá traer el mundo a nuestra mesa de trabajo.

LA SANGRE DEL CORDON UMBILICAL, por Ronald M. Kline

La sangre del cordón umbilical y placenta, que habitualmente se desecha, contiene células madre que pueden reconstruir la sangre y el sistema inmunitario de personas con leucemia y otros tipos de cáncer.

TORMENTAS ESPACIALES, por James L. Burch

Las ondas de choque del Sol pueden desencadenar grandes turbulencias en el espacio que rodea la Tierra poniendo en peligro los satélites y los astronautas que se hallen en órbita. Un satélite nuevo muestra ahora cómo evolucionan las tormentas espaciales.

RAIZ DE LA VIOLENCIA, por Roy F. Baumeister

¿Se vuelven violentas las personas porque se odien a sí mismas o por egolátrico orgullo?

RADIACION DE FONDO Y MODELOS COSMOLOGICOS, por Alejandro Gangui

Nuevos detectores a bordo de sondas espaciales medirán con suma precisión las fluctuaciones de la radiación de fondo. Dichas observaciones serán determinantes en la creación del modelo cosmológico.

